

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Олійник Юрій Анатолійович

УДК 620.179.16

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ

Спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить власні дослідження. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Ю.А. Олійник

Науковий керівник Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Олійник Ю.А. Методи ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів та їх реалізація. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі удосконалення методу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії (УЗТ) за рахунок використання фазоманіпульованих тестових сигналів та їх опрацювання методами фазометрії.

В роботі проведено аналіз літературних джерел, присвячених методу та існуючим засобам УЗТ виробів з конструкційно міцних матеріалів, методам формування вимірювальних часових інтервалів в таких товщиномірах. Встановлено, що в електроакустичних трактах товщиномірів обвідна луна сигналів зазнає значних змін та спотворень внаслідок значного розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів виробів та дії неконтрольованих шумів і завад. Це призводить до збільшення похибки формування часового інтервалу, і суттєво обмежує точність вимірювання товщини виробів.

Вказано, що перспективним напрямом розвитку ультразвукової лунаїмпульсного методу товщинометрії є застосування тестових сигналів більш складної структури, зокрема сигналів з фазовою маніпуляцією сигналу-носія. Це дає змогу підвищити точність формування часових вимірювальних інтервалів при проходженні коливань через контрольовані вироби і зменшити на цій основі похибку вимірювання їх товщини.

Запропоновано та досліджено амплітудно-фазовий метод УЗТ, який ґрунтується на використанні модифікованого за допомогою фазової маніпуляції

сигналу-носія зонduючого сигналу та подальшому аналізі фазових характеристик зонduючого та відбитого сигналів. Метод передбачає використання короткотривалих (два – чотири періоди сигналу-носія) фазоманіпульованих (ФМ) сигналів для зменшення похибки виділення сигналів УЗТ. Розглянута реалізація методу ґрунтується на використанні дискретного перетворення Гільберта сигналів УЗТ.

Проведені модельні дослідження довели можливість використання стрибків фазової характеристики зонduючого і донних сигналів після їх поширення в електроакустичному тракті товщиноміра для прецизійного вимірювання часу затримки ультразвукового сигналу та дозволили розробити методику реалізації запропонованого методу УЗТ.

Експериментально доведено можливість поширення луна сигналів з фазоманіпульованим сигналом-носієм в електроакустичних трактах засобів УЗТ, що дало змогу використовувати особливості фазових характеристик таких сигналів для підвищення точності визначення часу поширення луна сигналів у об'єкті контролю (ОК) та обґрунтувати необхідну смугу частот п'єзоелектричних перетворювачів.

Запропоновано удосконалення амплітудно-фазового методу УЗТ з використанням ФМ-сигналів за рахунок уточнення отриманої часової затримки шляхом вимірювання і врахування фазових зсувів сигналу-носія. Перевагою двошкального методу є те, що і грубе, і уточнююче значення часового інтервалу визначається на єдиній методологічній основі – за фазовою характеристикою сигналів УЗТ без зміни частоти сигналу-носія, що не потребує розширення робочої смуги частот товщиноміра. Отримано умову відсутності грубої помилки вимірювання часових інтервалів за двошкальним методом. Цей метод дає змогу зменшити абсолютну похибку формування і вимірювання часового інтервалу в ультразвуковому лунаїмпульсному товщиномірі до долі періоду дискретизації ($\pm 0,2T_d$).

Досліджено та удосконалено спосіб лунаїмпульсної УЗТ, який ґрунтується на визначенні часових інтервалів між донними імпульсами за положенням в часі

r -статистики, яка визначається за фазовою характеристикою сигналу-носія. Удосконалення методу ґрунтується на аналізі поточних значень зваженої r -статистики. Запропоновано визначати вагову функцію як отриманий в ковзному режимі відгук оператора середньоквадратичного відхилення на r -статистику. Методикою виявлення сигналів передбачається реалізація послідовного подвійного ковзного опрацювання даних – спочатку фазових даних, а потім r -статистики.

Дослідження завадостійкості удосконаленого методу УЗТ проводилось на моделі, що являє собою адитивну суміш послідовності загасаючих донних сигналів УЗТ і реалізації гаусового шуму. Результатами моделювання доведено, що додаткове вагове опрацювання r -статистики дає змогу підвищити відношення сигнал/шум на виході фазового виявляча сигналів не менше ніж на 40% за відношення сигнал/шум на вході виявляча 0,5 і більше.

За результатами проведеного моделювання було розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, яке реалізує запропоновані методи УЗТ. Виконані комп'ютерні обчислювальні експерименти на моделях сигналів дозволили відпрацювати програмну реалізацію процесу оброблення фазоманіпульованих сигналів УЗТ і підтвердити ефективність двошкального фазового методу лунаїмпульсної УЗТ для підвищення точності визначення затримки інформаційних сигналів і, в цілому, для підвищення точності вимірювання товщини виробів.

Проведено аналіз похибки визначення часових інтервалів за запропонованими методами, який дозволив визначити її найбільш вагомі складові і запропонувати шляхи їх зменшення.

Розроблено методики визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів для запропонованого і удосконаленого методів лунаїмпульсної УЗТ, що дало змогу створити програмне забезпечення для опрацювання фазоманіпульованих лунасигналів УЗТ та їх фазових характеристик. Це забезпечує прецизійне вимірювання часу поширення сигналів у виробі в широкому діапазоні змін пружних характеристик матеріалу.

Розроблено методику визначення товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвуку, яка ґрунтується на отриманні фазової характеристики сигналів лунаїмпульсного методу УЗТ і часових інтервалів за зваженою r -статистикою, що дає змогу зменшити похибку вимірювання товщини виробів за рахунок виявлення більшої кількості лунаісигналів.

Розроблено лабораторний зразок прецизійної системи лунаїмпульсної УЗТ, який реалізує розроблені методи і забезпечує, за рахунок використання тестових фазоманіпульованих сигналів та фазових методів опрацювання вимірювальної інформації, зменшення похибки вимірювання товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів в цілому на 35-40% у випадку опрацювання сигналів з низьким рівнем шуму (співвідношення сигнал/шум (с/ш) $\gg 1$) і на 15-20% у випадку зашумлених відбитих сигналів (с/ш < 1). Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення системи, яке реалізує запропоновані методи лунаїмпульсної УЗТ і може бути використане автономно з метою проведення відповідних комп'ютерних вимірювальних експериментів.

Проведено експериментальні дослідження на калібрувальному зразку СО-ЗР, який пройшов метрологічну повірку і визнаний таким, що відповідає вимогам ГОСТ 1857685. Експериментально доведена можливість застосування для удосконаленого методу УЗТ ультразвукових перетворювачів з вузькою смугою пропускання.

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), а також використані у навчальному процесі кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Комп'ютерно-інтегровані системи технічної та медичної діагностики».

Ключові слова: ультразвуковий контроль, лунаїмпульсний метод, товщинометрія, фазоманіпульований сигнал, фазова характеристика сигналу, фазометрія.

ABSTRACT

Oliinyk Y.A. Methods of ultrasonic thickness measurement using phase-manipulated signals and their implementation. - Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.11.13 «Instruments and methods of testing and determination of composition of substances» - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of ultrasonic pulse-echo thickness measurement improvement due to the use of phase-manipulated test signals and their processing by methods of phase measurement.

The paper analyzes literary sources devoted to the method and existing tools of ultrasonic thickness testing for products from structurally strong materials, methods for forming measuring time intervals in such thickness gauges. It is established that in the electroacoustic tracts of thickness gauges, the pulse envelope of echo waves undergoes significant changes and distortions due to the considerable spread of physical and mechanical characteristics of materials of products and the effect of uncontrolled noise and disturbances. This leads to an increase in the error of time interval formation, and significantly limits the accuracy of the thickness measurement of the products.

It is indicated that the promising direction of ultrasonic pulse-echo thickness measurement is the use of test signals of a more complex structure, in particular signals with phase manipulation of the carrier signal. It makes is possible to increase the accuracy of the formation of time measuring intervals during of signal's propagation through testing products and to reduce the error of thickness measurement based on it methods.

The amplitude-phase method of ultrasonic thickness measurement is proposed and investigated. It ased on the use of modified by phase-manipulated testing signal and subsequent analysis of the phase characteristics of the testing and echo signals. The method involves the use of short-term (two to four periods of signal-carrier) phase-

manipulation signals to reduce the error of allocation of the ultrasonic thickness measurement signals. The considered implementation of the method is based on the use of the discrete Hilbert transformation of ultrasonic signals.

The conducted model researches have proved the possibility of using jumps of the phase characteristic of the probe and the bottom signals after their propagation in the electroacoustic tract of the thickness gauge for precise measurement of the time of delay of the ultrasonic signal and allowed to develop a method of realization of the developed method of the ultrasonic thickness measurement.

The possibility of propagation of echoes with phase-manipulated carrier signal in electroacoustic tracts of the ultrasonic thickness gauge has been experimentally proved. This allows us to use the features of the phase characteristics of such signals to increase the accuracy of determining the time of propagation of echoes in the testing object (TO) and to justify the required band of frequencies for piezoelectric transducer.

Improvement of the amplitude-phase method of ultrasonic thickness measurement with the use of phase-manipulated signals is proposed by clarifying the received time delay by measuring and taking into account phase shifts of the carrier signal. The advantage of the two-way method is that it is rough and clarifying the value of the time interval is determined on a single methodological basis - the phase characteristic of the ultrasonic signals without changing the carrier signal frequency, which does not require the expansion of the working band of the thickness gauge. A condition for the absence of a coarse error in the measurement of time intervals by dual scale method is obtained. This method makes it possible to reduce the absolute error of the formation and measurement of the time interval in the ultrasonic pulse-echo thickness gauge to the part of the sampling period ($\pm 0,2T_d$).

The method ultrasonic pulse-echo thickness measurement is investigated and improved. It based on the determination of time intervals between bottom impulses in the position of time r-statistics, which is determined by the phase characteristic of the carrier signal. Improvement of the method is based on the analysis of the current values of the weighted r-statistics. It is proposed to determine the weight function as the response of the operator of the mean-square deviation to r-statistics obtained in the

sliding mode. The method of detecting signals assumes the implementation of a sequential double-slip processing of data - initially phase data, and then r-statistics.

The study of the noise stability of the improved ultrasonic method was carried out on a model. This model is an additive mix of the sequence of damped ultrasonic bottom signals and the realization of Gaussian noise. The results of simulation prove that the additional weight processing of r-statistics allows to increase the output signal-to-noise ratio at the of the phase detecting signals by at least 40% for the input signal-to-noise ratio at the of 0.5 or more.

Based on the results of the simulation, algorithmic and software software was implemented that implements the proposed ultrasonic techniques. Performed computer computing experiments on signal models allowed to work out the program realization of the processing of phase-manipulated ultrasonic signals and to confirm the effectiveness of the dual scale phase method of the ultrasonic pulse-echo thickness measurement to improve the accuracy of determining the delay of the information signals and in general to increase the accuracy of the products thickness measurement.

Analysis of the error of determination of time intervals by the developed methods is performed. It allowed to determine its most important error components and to suggest ways to reduce it.

Methods of determining the thickness of products from structurally durable materials for the proposed and improved methods of ultrasonic pulse-echo thickness measurement are developed. This allowed the creation of software for the processing of phase-manipulated signals of ultrasonic pulse-echo thickness measurement and their phase characteristics, and provided a precise measurement of the signal propagation time in the product in a wide range of changes in the elastic characteristics of the material.

A method for determining the thickness of products from materials with a significant attenuation of ultrasonic signals is developed. This method is based on obtaining the phase characteristic of the signals of the ultrasonic pulse-echo thickness measurement and the time intervals by the weighted r-statistics, which enables to reduce the error of measurement of the thickness of wares by detecting more echoes.

The laboratory sample of the precision system of the ultrasonic pulse-echo thickness measurement that implements the developed methods is developed. It provides by means of the use of test phase-manipulated signals and phase methods for processing the measurement information to reduce the error of measuring the thickness of products from structurally strong materials in general by 35-40% in the case of processing signals from low noise (signal/noise ratio $\gg 1$) and 15-20% in the case of noisy reflected signals (signal/noise ratio <1). Software-algorithmic support of the system, which implements proposed ultrasonic pulse-echo thickness measurement methods is developed and it can be used autonomously in order to perform appropriate computer-based measurement experiments.

Experimental research was carried out on a CO-3P calibration sample. This sample was metrologically calibrated and recognized as meeting the requirements of GOST 18576-85. Possibility to use ultrasonic transducers with a narrow bandwidth was experimentally proved for the advanced ultrasonic method of ultrasonic thickness measurement.

The main results of theoretical and experimental researches were introduced into the production process of the State-owned enterprise «Lutsk Repair Plant «Motor» (Lutsk), and also used in the educational process of the department of devices and systems for non-destructive testing of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» during the teaching of disciplines «Computer-integrated systems of technical and medical diagnostics».

Key words: ultrasonic testing, pulse-echo method, thickness measurement, phase-manipulated signal, phase signal characteristic, phaseometry.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у журналах, включених до наукометричних баз (Index Copernicus)

1. Олійник Ю.А. Фазовый способ ультразвуковой толщинометрии / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, Ю.В. Куц, В.Ю. Куц, // «Научни известия на НТСМ». – Созополь, Болгария, 2013. – № 2(139). – С.57-61. (Входит до The Web's Largest

Open Access Database of NTD, Google Scholar). *Здобувачем сформульована постановка задачі, розроблена методика проведення досліджень та опрацювання експериментальних даних.*

2. Derhunov O. Improvement of ultrasonic testing method for materials with significant attenuation / O. Derhunov, Y. Kuts, O. Monchenko, Y. Oliinyk, S. Shengur // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, ISSN 1729-3774. – 1/9(91) 2018.–P.54-610. (Входить до SCOPUS). *Здобувачем виконано аналіз літературних джерел, базового та удосконаленого (з ваговою обробкою r -статистики) методів виявлення сигналів УЗТ.*

Наукові статті

3. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – Київ, 2013. – № 1. – С. 23-27. *Здобувачем запропоновано використання в ультразвуковій товщинометрії фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх фазовими характеристиками, а також виконані експериментальні дослідження запропонованого способу.*

4. Олійник Ю.А. Експериментальні дослідження фазового методу ультразвукового неруйнівного контролю / Ю.А. Олійник, І.М. Бистра, Ю.В. Куц // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2013. – № 1/9 (61). – С.49-52. *Здобувачем експериментально підтверджено ефективність статистичної обробки фазових характеристик сигналів ультразвукового контролю в задачах виявлення сигналів на фоні значного шуму.*

5. . Олійник Ю.А. Використання ультразвукового двошкального способу для підвищення точності вимірювання товщини виробів / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, В.Ю. Куц, Ю.В. Куц, О.В. Монченко // Системи обробки інформації. – Харків, 2015. – №7(132). – С. 6-10. *Здобувачем виконано модельні та експериментальні дослідження двошкального способу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії.*

6. Мокійчук В.М. Методика оцінювання невизначеності вимірювання пружних констант матеріалів / В.М. Мокійчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // Системи обробки інформації. – Харків, 2016. – №6(143). – С. 93-96. *Здобувачем виконано оцінювання невизначеності вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракті приладу ультразвукового контролю.*

Патенти

7. Пат. 79972 Україна, МПК G01B17/02. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.В. Куц, В.Л. Найда, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201212606; заявл. 05.11.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл.№9.–4с. *Здобувачем теоретично обґрунтований спосіб ультразвукової товщинометрії з використанням фазомодульованих сигналів-носіїв.*

8. Пат. 100756 Україна, МПК G01B17/02. Ультразвуковий двошкальний спосіб вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201501408; заявл. 19.02.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. –3 с. *Здобувачем запропонована використання додаткових фазових вимірювань сигналу-носія та узгодження результатів грубого і точного вимірювань затримки сигналу.*

Тези доповідей

9. Олійник Ю.А. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.К. Цапенко // II Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2012. – С.101. *Здобувачем досліджено алгоритми опрацювання фазоманіпульованих сигналів ультразвукової товщинометрії.*

10. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник // III Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2013. – С.154-156. *Здобувачем*

проаналізовано спосіб ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів.

11. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, В.К. Цапенко // XII Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2013: стан і перспективи». Збірник тез доповідей /КПІ, Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 223-224. *Здобувачем запропоновано структуру експериментальної установки та методик експериментальних досліджень.*

12. Бистра І.М. Аналіз ефективності фазового методу виявлення сигналів ультразвукового контролю / І.М. Бистра, Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, В.К. Цапенко // XI Міжнар. науково-технічна конференції «Авіа-2013». Збірник тез доповідей /НАУ. – Київ, 2013. – Том I. – С. 1.9-1.12. *Здобувачем виконано оцінювання похибок першого і другого роду у задачі виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії за r -статистикою, обчисленою за фазовою характеристикою сигналу.*

13. Олійник Ю.А. Прецизійне вимірювання товщини фазовим способом ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.В. Левківська, О.В.Монченко // VII Міжнар. науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси». Збірник тез доповідей / НАУ. – Київ, 2014. – С. 94. *Здобувачем проаналізовано можливості двошкального методу ультразвукової товщинометрії з використання фазоманіпульованих сигналів.*

14. Куц Ю.В. Практична реалізація фазового способу ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк, О.В.Монченко, Ю.А. Олійник // 7-а науково-технічна конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання». Збірник тез доповідей / ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 49-53. *Здобувачем експериментально доведена можливість використання вузькосмугових p -з'єлектроіричних перетворювачів для передачі фазоманіпульованих сигналів в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів.*

15. Куц Ю.В. Особливості поширення фазоманіпульованих сигналів в електроакустичних трактах ультразвукових товщиномірів / Ю.В. Куц, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник, Р.М. Галаган // XIV Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2015: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 174-175. *Здобувачем досліджено і експериментально підтверджено можливість передачі стрибків фазової характеристики сигналів після поширення в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів.*

16. Олійник Ю.А. Дослідження амплітудно-частотних характеристик п'єзоперетворювачів для фазових ультразвукових приладів неруйнівного контролю / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, О.В. Монченко // V Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2015. – С.244. *Здобувачем експериментально отримані і проаналізовані амплітудно-частотні характеристики п'єзоперетворювачів для лунаїмпульсних ультразвукових товщиномірів з фазоманіпульованими сигналами-носіями.*

17. Олійник Ю.А. Використання фазоманіпульованих сигналів для підвищення точності вимірювання товщини виробів з композиційних матеріалів / Ю.А. Олійник, Б.В. Добржанська, О.В. Монченко // III Міжнар. наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». Збірник тез доповідей / ВНТУ. – Вінниця, 2015. – С.32. *Здобувачем запропонована методика оброблення фазоманіпульованих сигналів в ультразвукових товщиномірах та виконувались експериментальні дослідження.*

18. Мокийчук В.М. Оценивание неопределенности измерения модуля Юнга / В.М. Мокийчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // XIII Междунар. научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты». Сборник докладов / БелГИМ. – Минск, Беларусь, 2016. – С.93. *Здобувачем запропонована методика оцінювання невизначеності вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракті приладів ультразвукового контролю*

19. Монченко О.В. Дослідження впливу апертури вікна для виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії композиційних матеріалів / О.В. Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник // VI Міжнар. науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧНТУ. – Чернігів, 2016. – С. 346. *Здобувачем проаналізовано вплив зміни апертури вікна на вірогідність виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії.*

20. Монченко О.В. Розробка методів оброблення фазової характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії з підвищеною достовірністю / О.В. Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник, Р.О. Ткачик // X Міжнар. науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей / Інститут Метрології. – Харків, 2016. – С.25. *Здобувачем надано рекомендації щодо методики опрацювання фазової характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії.*

21. Олійник Ю.А. Двошкальний фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, О.В. Монченко, О.Д. Близнюк // XV Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2018: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / КПІ ім.. І. Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2018. – С. 177-178. *Здобувачем проведені комп'ютерні обчислювальні експерименти та відпрацьовано програмну реалізацію процесу опрацювання експериментальних даних.*

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ..... | 17 |
| СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 18 |
| ВСТУП..... | 19 |
| РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЛУНАІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБІВ З КОНСТРУКЦІЙНО МІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ..... | 27 |
| 1.1 Аналіз виробів з конструкційно міцних матеріалів як об’єктів ультразвукового контролю..... | 27 |
| 1.2 Фізичні принципи лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії..... | 37 |
| 1.3 Сучасний стан розвитку апаратних засобів лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії..... | 45 |
| 1.4 Методи формування вимірювальних часових інтервалів в ультразвукових лунаїмпульсних товщиномірах..... | 50 |
| 1.5 Постановка завдань дослідження..... | 58 |
| Висновки до розділу | 60 |
| РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ЛУНАІМПУЛЬСНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ-НОСІЇВ | 62 |
| 2.1 Фазоманіпульовані сигнали та їх проходження через резонансні кола | 62 |
| 2.2 Амплітудо-фазовий лунаїмпульсний метод ультразвукової товщинометрії з використанням сигналів-носіїв з фазовою маніпуляцією | 66 |
| 2.3 Розроблення двошкального лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв | 74 |
| 2.3.1 Метод багатошкальних багаточастотних фазових вимірювань... | 75 |

| | | |
|---|--|-----|
| 2.3.2 | Сутність двошкального методу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв .. | 77 |
| 2.3.3 | Моделювання процесу вимірювання товщини виробів за двошкальним методом ультразвукової товщинометрії з фазоманіпульованими сигналами..... | 82 |
| 2.4 | Структурна схема розробленого засобу ультразвукової товщинометрії..... | 88 |
| | Висновки до розділу | 89 |
| РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЛУНАІМПУЛЬСНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ЗА РАХУНОК СТАТИСТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ-НОСІЯ | | |
| 3.1 | Оцінювання завадостійкості в засобах лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії..... | 91 |
| 3.2 | Аналіз базового методу лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії з використанням статистичного опрацювання фазових характеристик сигналів..... | 95 |
| 3.3 | Удосконалення базового методу ультразвукової товщинометрії за рахунок зваженого оцінювання r -статистики | 104 |
| | Висновки до розділу | 116 |
| РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ВИРОБІВ З КОНСТРУКЦІЙНО МІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ | | |
| 4.1 | Структура засобу, що реалізує розроблені методи лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії..... | 118 |
| 4.2 | Експериментальні дослідження процесу поширення фазоманіпульованого сигналу в електроакустичному тракті ультразвукового товщиноміра..... | 123 |
| 4.3 | Експериментальні дослідження можливості використання вузькосмугових перетворювачів для передачі фазоманіпульованих сигналів..... | 130 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.4 | Експериментальні дослідження ефективності статистичного опрацювання фазової характеристики сигналу для розв’язання задачі виявлення лунасигналів ультразвукової товщинометрії на фоні значних шумів | 134 |
| 4.5 | Методика оцінювання невизначеності вимірювання товщини виробів..... | 137 |
| | Висновки до розділу | 143 |
| | ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 144 |
| | СПИСОК ВІКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 147 |
| | ДОДАТОК А..... | 159 |
| | ДОДАТОК Б | 165 |
| | ДОДАТОК В..... | 166 |
| | ДОДАТОК Г | 167 |
| | ДОДАТОК Д..... | 174 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
АХС – амплітудна характеристика сигналів;
ВРД – вибіркова результуюча довжина вектора;
ЕАТ – електро-акустичний тракт;
НК – неруйнівний контроль;
КМ – конструкційні матеріали;
ОК – об'єкт контролю;
ПГ – перетворення Гільберта;
ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач;
ПЗ – програмне забезпечення;
ПК – персональний комп'ютер;
С/Ш – сигнал/шум;
УЗНК – ультразвуковий неруйнівний контроль;
УЗТ – ультразвукова товщинометрія;
УЛЗ – ультразвукова лінія затримки;
ФМ – фазоманіпульовані сигнали;
ФХС – фазова характеристика сигналу;
ФЧХ – фазочастотна характеристика сигналу;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ЦОС – цифрова обробка сигналів.

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$U(t), \Phi(t)$ – амплітудна і фазова характеристики сигналу;
 $\varphi(t)$ – дробова частина $\Phi(t)$;
 c – швидкість поширення ультразвуку в матеріалі ОК;
 f – частота сигналу;
 h – товщина ОК;
 $k_{\text{ЕАТ}}$ – коефіцієнти електроакустичного тракту;
 M_w – апертура ковзного вікна відбору даних;
 $p(x)$ – щільність розподілу ймовірності випадкової величини;
 P – ймовірність;
 r – вибіркова результуюча довжина вектору (статистика r);
 t – час (поточний час);
 T, T_d – період сигналу та період його дискретизації;
 T_A, T_C – час аналізу та час спостереження сигналу;
 u_d, u_z – донний та зондуючий сигнали УЗТ;
 V – вибіркова кругова дисперсія
 $W(t)$ – функція вікна;
 $u(t), \hat{u}(t)$ – детермінований сигнал та його гільберт-образ;
 $u[j]$ – дискретна послідовність значень $u(t)$;
 $\xi(t)$ – гаусовий шум;
 σ – середньоквадратичне відхилення;
Med – оператор медіанної фільтрації;
 φ – початкова фаза сигналу;
 \mathbf{M}, \mathbf{D} – оператори математичного сподівання і дисперсії;
 $\mathbf{H}[\cdot]$ – оператор прямого ПГ;
 \mathbf{K} – оператор, що усуває стрибки ФХС в точках кратних 2π
 \mathbf{L} – оператор визначення дробової частини ФХС
 Π – пороговий рівень.

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення надійної експлуатації машин і механізмів, конструкцій і споруд, технологічного обладнання у різних галузях промислово-господарчого комплексу України є необхідною умовою технологічного, економічного і соціального прогресу суспільства. В ряді галузей ця проблема особливо загострюється у зв'язку з тим, що ряд об'єктів, які експлуатуються тривалий час, вичерпали призначений ресурс роботи і подовження їх безаварійної роботи можливе за результатами об'єктивного контролю їх поточного стану.

Однією з необхідних умов безаварійної експлуатації складних технічних систем є їх діагностика та контроль на різних етапах життєвого циклу – створення конструкційних матеріалів, виготовлення виробів та їх експлуатаційного контролю. Для виявлення дефектів, які виникають в конструктивних елементах в процесі експлуатації, ще на початкових стадіях їх утворення використовують методи неруйнівного контролю (НК), зокрема і методів ультразвукового неруйнівного контролю (УЗНК).

Значне коло завдань УЗНК пов'язане з визначенням геометричних розмірів об'єктів контролю (ОК). Стоншення елементів конструкцій і механізмів внаслідок зношування та дії різних видів корозії було і лишається однією з найбільших загроз втрати ними несучої спроможності, погіршення експлуатаційних характеристик та руйнування. Традиційним методом ультразвукової товщинометрії (УЗТ) є лунаїмпульсний метод (у закордонній технічній літературі – pulse-echo method), який ґрунтується на визначенні часу проходження ультразвукових коливань в ОК. На початкових етапах розроблення УЗТ цей метод застосовувався для контролю виробів з металів та сплавів, тому саме фізико-механічні властивості останніх визначали основні ідеї та напрями розвитку лунаїмпульсного методу. Зокрема це мало вирішальний вплив на обґрунтування частотного діапазону сигналів УЗТ, створення різних типів перетворювачів ультразвукових коливань, розроблення та удосконалення

апаратурної реалізації та методів оцінювання параметрів та характеристик сигналів УЗТ.

Значний внесок в розвиток методів та засобів УЗТ зробили відомі українські та закордонні вчені: Альошин Н. П., Білокур І. П., Гурвіч А. К., Доммаркас В. І., Єрмолов І. М., Кажис Р.-І. Ю., Карпаш О. М., Карпельсон А. Є., Кисіль І. С., Ключев В. В., Корольов М. В., Крауткремер Г., Крауткремер Й., Луценко Г. Г., Мак-Мастер Р., Мозговий О. В., Самойлович Г.С., Соколов С.Я., Сухоруков В. В., Троїцький В. О., Щербинський В.Г. та ін. Незважаючи на значну кількість теоретичних і практичних робіт УЗК лишається областю інтенсивних наукових і інженерних досліджень.

Останнім часом в промисловості і на транспорті значного поширення набувають нові конструкційні матеріали, номенклатура яких стрімко зростає. Зокрема до таких матеріалів належать композиційні матеріали, які порівняно з металами характеризуються більшим загасанням ультразвукових коливань та розкидом фізико-механічних характеристик. Контроль товщини виробів з таких матеріалів традиційними методами ускладнений внаслідок суттєвого зменшення відношення сигнал/шум (с/ш), що перешкоджає досягненню високих показників чутливості, розрізнявальної здатності та інших метрологічних характеристик.

Відзначені особливості задач контролю товщини виробів із сучасних конструкційних матеріалів висувають підвищені вимоги до методів та систем опрацювання інформаційних сигналів. Слід зазначити, що в більшості лунаїмпульсних товщиномірів методологія опрацювання сигналів ґрунтувалась на використанні їх амплітудних характеристик. В той же час закладена в фазових характеристиках сигналів інформація не використовувалась.

Отримання вимірювальної інформації з фазових характеристиках сигналів передбачає використання високотехнологічних фазових методів оброблення сигналів. В останні роки значні успіхи в розвитку цифрової і мікропроцесорної техніки, інформаційно-вимірювальних технологій створили умови для широкого застосування таких методів в засобах УЗНК. Таким чином завдання удосконалення лунаїмпульсного методу УЗТ на основі більш повного

використання особливостей фазової структури інформаційних сигналів є актуальним і економічно виправданим, а його вирішення дозволить розширити функціональні можливості лунаїмпульсного методу та підвищити точність вимірювання товщини виробів з нових конструкційних матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематичних планів науково-дослідних робіт кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» згідно Закону України № 3715-VI від 05.12.2012 «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема за напрямом «Приладобудування, як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробництва».

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-технічної задачі підвищення точності засобів лунаїмпульсної УЗТ за рахунок використання фазоманіпульованих сигналів та методів детермінованого та статистичного опрацювання їх фазових характеристик в широкому діапазоні змін акустичних властивостей матеріалів.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені та вирішені наступні завдання:

- проаналізувати сучасні засоби ультразвукової товщинометрії та реалізовані в них методи опрацювання інформаційних сигналів, дослідити можливість використання фазоманіпульованих сигналів в засобах лунаїмпульсної УЗТ для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх поширення в ОК;
- розробити новий лунаїмпульсний метод прецизійної УЗТ, орієнтований на використання фазоманіпульованого сигналу-носія;
- удосконалити лунаїмпульсний метод УЗТ з фазовим статистичним опрацюванням сигналів, що ґрунтується на аналізі отриманої в ковзному режимі r -статистики з метою забезпечення працездатності за менших відношень с/ш сигналів УЗТ;

- експериментально дослідити процеси проходження ФМ-сигналів в електроакустичних трактах УЗТ та вимірювання часу затримки сигналів в ОК;
- розробити методики визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів для запропонованого і удосконаленого лунаїмпульсних методів УЗТ;
- розробити дослідний зразок засобу лунаїмпульсної УЗТ з покращеними показниками точності вимірювання за рахунок використання тестових фазоманіпульованих сигналів та фазових методів опрацювання сигналів;
- розробити програмно-алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропоновані методи та методики УЗТ.

Об'єкт дослідження – процес визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів лунаїмпульсним методом УЗТ.

Предмет дослідження – лунаїмпульсний метод ультразвукової товщинометрії виробів з конструкційно міцних матеріалів на основі аналізу фазової характеристики фазоманіпульованих сигналів УЗТ.

Методи дослідження базуються на використанні: методів технічної діагностики і неруйнівного контролю; теорії вимірювань; математичного аналізу; цифрового аналізу сигналів, зокрема дискретного перетворення Гільберта, теорії ймовірності та математичної статистики; комп'ютерного моделювання та опрацювання експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано амплітудно-фазовий метод лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії, який ґрунтується на використанні фазової маніпуляції сигналу-носія зондуючих сигналів, що дозволило визначати час поширення ультразвукових сигналів у виробі за моментами стрибкоподібної зміни фазової характеристики сигналу-носія і підвищити на цій основі точність вимірювання товщини виробу.

2. Вперше запропоновано двошкальний лунаїмпульсний метод ультразвукової товщинометрії, який ґрунтується на уточненні часу затримки

лунасигналів, визначених за моментами стрибкоподібної зміни фазової характеристики фазоманіпульованого сигналу-носія, за рахунок вимірюваних фазових зсувів сигналу-носія відбитих лунасигналів, що дало змогу додатково підвищити точність визначення часу затримки ультразвукового сигналу у виробі і в цілому – підвищити точність вимірювання товщини виробу за зменшеного відношення сигнал/шум.

3. Удосконалено метод УЗТ який ґрунтується на визначенні часових інтервалів між донними імпульсами за положенням в часі r -статистики. Удосконалення методу полягає у використанні зваженої r -статистики з визначенням вагової функції, як отриманого в ковзному режимі відгука оператора середньоквадратичного відхилення на вибірку статистики r . Використання зваженої r -статистики дозволяє впевнено виявляти лунасигнали УЗТ за відношення $c/\text{ш} < 1$, що дає змогу досліджувати вироби в широкому діапазоні змін акустичних властивостей матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Експериментально доведено можливість поширення лунасигналів з фазоманіпульованим сигналом-носієм в електроакустичних трактах засобів УЗТ, що дало змогу використовувати особливості фазових характеристик таких сигналів для підвищення точності визначення часу поширення лунасигналів у ОК та обґрунтувати необхідну смугу частот п'єзоелектричних перетворювачів.

2. Розроблено методику визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів за методами, які ґрунтуються на отриманні і опрацюванні фазової характеристики фазоманіпульованих лунасигналів УЗТ, що дає змогу виконати прецизійне вимірювання часу поширення сигналів у ОК.

3. Розроблено методику визначення товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвуку, яка ґрунтується на отриманні фазової характеристики сигналів лунаімпульсного методу УЗТ і часових інтервалів за зваженою r -статистикою, що дає змогу за рахунок виявлення більшої кількості лунасигналів зменшити похибку вимірювання товщини виробів.

4. Виконані комп'ютерні обчислювальні експерименти на заданих моделях сигналів-носіїв з фазовою маніпуляцією дали змогу відпрацювати програмну реалізацію процесу опрацювання таких сигналів і підтвердити ефективність запропонованих ультразвукових лунаїмпульсних методів УЗТ.

5. Розроблено структуру апаратно-програмного засобу лунаїмпульсного методу УЗТ, що дало змогу за рахунок використання тестових ФМ-сигналів та фазових методів їх опрацювання зменшити похибку вимірювання товщини виробів у широкому діапазоні зміни пружних характеристик матеріалу. Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропоновані лунаїмпульсні методи УЗТ і може бути використане як самостійно, так і у складі ультразвукових товщиномірів.

6. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), у навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ імені Ігоря Сікорського під час викладання дисципліни «Комп'ютерно-інтегровані системи технічної та медичної діагностики».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто та на основі узагальнень та висновків з колективно отриманих результатів. В дисертації не використовувались ідеї та розробки, що належать співавторам спільно опублікованих наукових праць. Деякі матеріали спільних робіт використано в дисертаціях кандидата технічних наук Монченко О.В., 2010 р. (спец. вчена рада Д26.062.01 Національного авіаційного університету); кандидата технічних наук Бистрої І.М., 2014 (спеціалізована вчена рада Д 26.062.01 Національного авіаційного університету).

У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [1] – постановку задачі, розроблено методику проведення досліджень та опрацювання експериментальних даних; [2] – аналіз літературних джерел, базового та удосконаленого методів виявлення сигналів УЗТ; [3,7,10, 11] – запропоновано використання в УЗТ фазоманіпульшованих сигналів для прецизійного визначення

часу затримки сигналів, а також виконані експериментальні дослідження нового методу УЗТ; [4] – експериментально підтверджено ефективність статистичної обробки фазових характеристик сигналів УЗТ в задачах виявлення лунасигналів на фоні значного шуму; [5, 8, 13, 21] – модельні та експериментальні дослідження двошкального лунаїмпульсного методу УЗТ, відпрацювання програмної реалізації процесу опрацювання експериментальних даних; [6, 18] – оцінювання невизначеності вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракті приладу УЗТ; [9, 17, 20] – алгоритми та методики опрацювання ФМ-сигналів УЗТ; [12, 19] – оцінювання похибок у методі УЗТ на основі використання r -статистики, обчисленої за фазовою характеристикою сигналу УЗТ; [14, 15] – експериментально доведена можливість використання вузькосмугових п'єзоелектричних перетворювачів для передачі фазоманіпульованих сигналів в електроакустичному тракті УЗТ; [16] – експериментально отримані і проаналізовані амплітудно-частотні характеристики п'єзоперетворювачів для лунаїмпульсної УЗТ з ФМ-сигналами.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на симпозіумах, конференціях і семінарах, зокрема на: міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2012, 2013, 2015, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м. Київ, 2013, 2015, 2018); міжнародній конференції «Дні неруйнівного контролю» (Болгарія, 2013); міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2013» (Київ, 2013); міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (Київ, 2014); науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2014); міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, 2015); міжнародному науково-технічному семінарі «Неопределенность измерений: научные,

законодательные, методические и прикладные аспекты» (Мінськ, Беларусь, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (Харків, 2016).

Публікації: За темою дисертації опубліковано у 21 науковій праці, у тому числі 5 у спеціалізованих фахових виданнях України (з них один входить до науково-метричної бази Scopus), та 1 у закордонному виданні (входить до науково-метричних баз The Web's Largest Open Access Database of NTD, Google Scholar), 2 патенти України на корисну модель, 13 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури, п'яти додатків і має 145 сторінок основного тексту, 45 рисунків, 9 таблиць, список використаної літератури з 113 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 174 сторінки.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЛУНАІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБІВ З КОНСТРУКЦІЙНО МІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ

Незважаючи на значні досягнуті раніше успіхи у розробленні питань теорії і практики ультразвукового неруйнівного контролю (УЗНК) [1-6] ці питання не лишаються поза увагою фахівців у цій галузі і на початку XXI століття [7-15]. Це повною мірою стосується і питань розвитку методів і засобів лунаімпульсного методу ультразвукової товщинометрії.

В даному розділі виконано аналіз конструкційно міцних матеріалів, які використовуються у сучасному виробництві, стану і основних тенденцій розвитку методів і засобів ультразвукової товщинометрії, сформульовано науково-технічну задачу дослідження, обґрунтовано основні завдання дослідження та шляхи їх вирішення.

1.1 Аналіз виробів з конструкційно міцних матеріалів як об'єктів ультразвукового контролю

Під конструкційними розуміють матеріали, з яких виготовляють деталі конструкцій різного призначення, що зазнають силових навантажень [16-19]. Визначальними характеристиками конструкційних матеріалів (КМ) є їх механічні властивості, що вирізняє їх з-поміж інших технічних матеріалів. До основних критеріїв оцінки їх якості належать параметри опору до зовнішніх механічних навантажень: міцність, тривала міцність, пластичність та ударна в'язкість [20,21].

Міцність – здатність матеріалу чинити опір незворотній (пластичній) деформації і руйнуванню (розділенню на частини) під дією механічних навантажень або інших чинників.

Тривала міцність – властивість матеріалу протидіяти руйнуванню за довгочасної дії статичного навантаження та високої температури.

Під пластичністю розуміють здатність матеріалу незворотно змінювати свою форму й розміри в процесі деформації. Тверді тіла змінюють свою форму й розміри лише за доволі значних механічних навантажень.

Ударна в'язкість – це здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації і руйнування під дією ударного навантаження. Зазвичай, оцінюється роботою, що виконана до руйнування надрізаного зразка при ударному згині, віднесеною до площі його перерізу в місці надрізу (вимірюється в Дж/м²).

Важливою характеристикою якості готового виробу є конструкційна міцність [22], тобто міцність матеріалу конструкції з урахуванням конструкційних, технологічних і експлуатаційних чинників. Конструкційна міцність зазвичай є меншою за власне міцність матеріалу. Невідповідність між конструкційною міцністю і міцністю матеріалу, що визначена на зразку з використанням випробних машин, залежить від:

- форми та розмірів деталі (наявності джерел концентрації напружень у вигляді отворів, рівців тощо);
- різних механізмів руйнування матеріалу виробу;
- стану матеріалу у поверхневих шарах виробу;
- анізотропії властивостей матеріалу;
- особливостей середовища, що контактує з поверхнями виробу тощо.

Серед перелічених факторів, що впливають на конструктивну міцність виробу, є його геометричні розміри. Процес неконтрольованого стоншення деталей внаслідок деформацій, руйнівної дії навколишнього середовища і т.і. можуть призвести до фатальних наслідків. Одним з шляхів зменшення ризиків руйнування конструкцій є застосування високоточних, надійних засобів товщинометрії, зокрема і УЗТ.

Для виготовлення деталей конструкцій використовують різні матеріали. Їх класифікації та відомості про них наведені в [16,17, 20,21]. В залежності від обраної класифікаційної ознаки КМ поділяються:

- за природою матеріалів – на металеві, неметалеві і композиційні матеріали, що поєднують корисні властивості двох попередніх;
- за технологічними особливостями переробки – на деформовані (прокат, поковки, штамповки тощо), ливарні, спічні, формовані, клеєні, зварні;
- за умовами роботи – на ті, що працюють за низьких температур, жароміцні, корозіє-, окалино-, зносостійкі і т.п.;
- за критеріями міцності – на матеріали малої і середньої міцності з великим запасом пластичності, високоміцні з помірним запасом пластичності.

Металеві КМ поділяють за системами сплавів на чорні метали (сталі та чавуни) та сплави кольорових металів (алюмінієві, магнієві, титанові, мідні, нікелеві, молібденові, вольфрамові тощо).

До металевих КМ належить більшість марок сталей, які називають «конструкційними». Виняток становлять сталі, які не використовуються в силових елементах конструкцій. Сталі становлять основний обсяг КМ, що знайшли застосування у техніці. Вони відрізняються широким діапазоном міцності – від 200 до 3000 МН/м², пластичність сталей сягає 80%, ударна в'язкість – до 3 МДж/м².

Чавуни широко використовуються у машинобудуванні для виготовлення станин, колінчастих валів, зубчастих коліс, блоків циліндрів двигунів внутрішнього згорання, деталей, що працюють за температури до 1200 °С в окиснювальних середовищах. Міцність чавунів у залежності від легування змінюється в інтервалі значень 110 ... 1350 МН/м².

Нікелеві та кобальтові сплави зберігають міцність до температур 1000...1100 °С. Такі КМ застосовують в авіаційних і ракетних двигунах, парових турбінах, апаратах, що працюють в агресивних середовищах.

Алюмінієві сплави застосовують для виготовлення корпусів літаків, вертольотів, ракет, суден, їх міцність сягає значення 750 МН/м².

Магнієві сплави мають міцність до 400 МН/м² і вище та малу густину (у 4 рази меншою від сталі), застосовуються переважно у вигляді литва в літако- та автомобілебудуванні, поліграфічній промисловості тощо.

Титанові сплави успішно конкурують в ряді галузей техніки зі сталями і алюмінієвими сплавами, перевершуючи їх за питомими міцністю та механічною жорсткістю, корозійною стійкістю. Сплави мають міцність до 1600 МН/м^2 і більше. Застосовуються для виготовлення компресорів авіаційних двигунів, в хімічній та нафтопереробній промисловості. Важливі для ультразвукової товщинометрії акустичні властивості деяких металів та їх сплавів, отримані на частоті коливань 2,5 МГц, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Акустичні властивості деяких металів та їх сплавів

| Речовина | $c_l \cdot 10^{-3},$ $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ | $c_t \cdot 10^{-3},$ $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ | $\rho \cdot 10^{-3},$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ | $\alpha,$ $\text{Нп} \cdot \text{м}^{-1}$ | $z \cdot 10^{-6},$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ |
|------------------|--|--|--|--|---|
| Алюміній | 6,24 | 3,1 | 2,7 | 0,1...1 | 0,05...0,06 |
| Бронза | 3,5...3,8 | 2,3...2,5 | 8,0...9,0 | — | 30,0...34,0 |
| Вольфрам | 5,32 | 2,6 | 19,3 | — | 102,7 |
| Дюралюміній | 6,2...6,4 | 3,0...3,2 | 2,7...2,8 | 0,1...1,0 | 19,0...20,0 |
| Залізо | 5,93 | 3,23 | 7,8 | 0,2...5,0 | 46,3 |
| Латунь | 4,3...4,7 | 3,1...3,5 | 8,4...8,5 | | 36,0...40,0 |
| Мідь | 4,72 | 2,4 | 8,9 | 1,5...5,0 | 42,0 |
| Нікель | 5,7 | 3,0 | 8,9 | — | 50,7 |
| Олово | 3,32 | 1,67 | 7,3 | — | 24,2 |
| Свинець | 2,16 | 0,87 | 11,4 | — | 24,6 |
| Срібло | 3,65 | 1,65 | 10,5 | — | 38,3 |
| Сталь вуглецева | 5,9...5,94 | 3,22...3,25 | 7,7...7,9 | 0,1...10 | 45,9...46,3 |
| Титанові сплави | 6,05...6,3 | 3,1...3,3 | 4,5...4,7 | — | 27,0...29,0 |
| Сталь аустенітна | 5,7...6,14 | 3,30...3,31 | 7,6...8,0 | 0,3...40 | 44,0...48,0 |
| Цинк | 4,17 | 2,41 | 7,1 | — | 29,6 |
| Чавун | 3,5...5,8 | 2,2...3,2 | 7,2...7,6 | 0,3...50 | 26,0...42,0 |

В цій таблиці використано такі позначення: c_l – швидкість поздовжніх хвиль, c_t – швидкість поперечних хвиль, α – коефіцієнт загасання ультразвуку за інтенсивністю, z – акустичний імпеданс, ρ – густина матеріалу.

Зменшення енергії ультразвукових хвиль після їх поширені в середовищі прийнято кількісно оцінювати коефіцієнтом загасання [2, 23], який визначається як

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \left(\frac{A_0}{A} \right) \quad (1.1)$$

де h – товщина ОК ($2h$ – це загальна відстань, яку проходить хвиля в ОК у разі використання лунаїмпульсного методу);

A_0 – початкова амплітуда ультразвукової хвилі;

A – амплітуда хвилі, після поширення в ОК на відстань $2h$.

Процес загасання ультразвукових хвиль в ОК відбувається внаслідок декількох причин, основними з яких є: зменшення амплітуди хвилі зі збільшенням відстані від джерела, обумовлене його формою і хвиловими розмірами, розсіювання звуку на неоднорідностях середовища його поширення, незворотний перехід енергії звукової хвилі у інші форми, наприклад, у тепло.

До неметалевих КМ відносяться пластики, кераміка, металокераміка, скло, деревина тощо. Їх поділяють за ізомерним складом, технологічним виконанням (пресовані, намотані, формовані тощо), типами наповнювачів (армувальних елементів) і за характером їх розташування та орієнтації. Такі матеріали застосовують в авіації, ракетобудуванні, в енергетичному та транспортному машинобудуванні, у вузлах тертя тощо. Крім того, з кераміки виготовляють деталі, які працюють за високих температур. Основою цих матеріалів є порошки тугоплавких сполук типу карбідів, боридів, нітридів та оксидів.

У металокераміці основою є кераміка, у яку додається певна кількість металу, що є зв'язкою і забезпечує такі властивості, як пластичність і в'язкість. Акустичні властивості деяких неметалевих КМ наведені в таблиці 1.2.

Композиційні матеріали являють собою сполуки, що отримуються штучним шляхом об'ємного поєднання двох (і більше) різнорідних матеріалів, що суттєво відрізняються між собою за властивостями: один має властивість пластичності (матриця), а інший наділений високою міцністю і жорсткістю (наповнювач, арматура) [24-27]. В якості як першого, так і другого компонента можуть виступати найрізноманітніші за природою і походженню матеріали.

Матричними матеріалами можуть бути метали і їхні сплави, органічні та неорганічні полімери, кераміка та інші речовини.

Таблиця 1.2. Акустичні властивості деяких неметалевих КМ

| Речовина | $c_l \cdot 10^{-3},$ $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ | $c_t \cdot 10^{-3},$ $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ | $\rho \cdot 10^{-3},$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ | $\alpha,$ $\text{Нп} \cdot \text{м}^{-1}$ | $z \cdot 10^{-6},$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ |
|-----------------|--|--|--|--|---|
| Бетон | 2,1...5,2 | — | 1,8...2,8 | — | 6,0...9,5 |
| Кварц плавлений | 5,95 | 3,75 | 2,2 | 0,31 | 13,1 |
| Полістирол | 2,37 | 1,12 | 1,12 | 10...13 | 2,5 |
| Скло віконне | 5,7 | 3,4 | 2,1...2,6 | 0,4...0,7 | 11,0...15,0 |
| Органічне скло | 2,65...2,73 | 1,12...1,2 | 1,17...1,2 | 25...35 | 3,0...3,3 |
| Текстоліт | 2,4...2,8 | | 2,3...2,5 | 80...120 | 6,0...6,4 |
| Фарфор | 5,3...5,35 | 3,5...3,7 | 2,3...2,6 | 0,1...0,4 | 15,0...20,0 |
| Фторопласт | 1,35 | — | 2,2 | 180 | 3,0 |
| Ебоніт | 2,4 | — | 1,2 | 90 | 2,9 |
| Капрон | 2,5 | 1,1 | 1,1 | — | — |
| Нейлон | 1,8...2,2 | — | 1,1...1,2 | 33 | — |

Підсилюючими компонентами найчастіше є тонкодисперсні порошкоподібні частинки або волокнисті матеріали різної природи. Можливості щодо зміцнення композитів дає табл.1.3, в якій наведено механічні властивості деяких волокон [26].

У разі застосування тонких волокон діаметром декілька мікрон і менше одержують високу міцність, характерну для тіл з довершеною структурою. В якості волокнистих наповнювачів застосовують різні органічні волокна природного походження і набагато міцніші волокна штучного походження: скловолокно, вуглецеві, металеві волокна і так звані «вуса» – спеціально вирощені високоміцні монокристалічні волокна на основі графіту, оксиди алюмінію і т.і. Вуса мають механічну міцність, еквівалентну міцності зв'язку між атомами. Міцність вусів обумовлена бездефектністю структури кристалів. Наприклад, вуса карбіду кремнію мають міцність більшу за 30 ГПа і модуль пружності розтягнення більший за 690 ГПа.

Скляні волокна є найдешевшими і широко застосовуються для виготовлення конструкційних склопластиків, з яких роблять корпуси невеликих морських суден, ракет, торпед, мін, літаків. За порівняно малої щільності (1,8-2,6 г/см³) вони мають високу міцність, низьку теплопровідність, немагнітні, радіо прозорі і порівняно недорогі.

Таблиця 1.3. Механічні властивості волокон

| Вид волокна | Щільність, г/см ³ | Модуль пружності, ГПа | Середня міцність на базі 10мм, ГПа | Гранична деформація, % |
|--|---------------------------------|-----------------------------|---|------------------------------|
| Скловолокно ВМ-1 | 2,58 | 95 | 4,2 | 4,8 |
| Скловолокно (М-скло, США) | 2,89 | 110 | 3,5 | 4,8 |
| Арамідне волокно Терлон | 1,45 | 160 | 3,6 | 3,5 |
| Арамідне волокно Кевлар-49 (США) | 1,45 | 140 | 3,8 | 3,5 |
| Вуглецеве волокно Кулон | 1,9 | 600 | 2,0 | 0,4 |
| Вуглецеве волокно ЦелионG4-70 (США) | 1,77 | 530 | 4,3 | 1,8 |
| Вуглецеве волокно М- 50 (Японія) | 1,9 | 500 | 2,35 | 0,5 |
| Борне волокно AVCO (США) | 2,5 | 400 | 3,5 | 0,9 |
| Борне волокно Wacker-Chimie (ФРН) | 2,5 | 420 | 3,1 | 0,7 |
| Алюмінієве волокно | 2,7 | 70 | 0,29 | — |
| Берилієве волокно | 1,85 | 310 | 1,1 | — |
| Вольфрамове волокно | 19,3 | 410 | 3,3 | — |

Борні волокна відносяться до числа напівпровідників, що веде до появи в композиті електропровідності і підвищеної (в порівнянні з склопластиком) теплопровідності.

Варіюючи склад матриці і наповнювача, змінюючи орієнтацію наповнювача, можна отримати різноманітні нові композиційні матеріали з необхідним набором властивостей, які кількісно і якісно відрізняються від властивостей його складових.

У широкому розумінні переважна більшість сучасних матеріалів утворюється поєднанням певних складових. Проте сучасне визначення композиційних матеріалів (або просто композитів) передбачає виконання наступних вимог:

- композиція повинна бути поєднанням хоча б двох різнорідних матеріалів з чіткою межею розділу між фазами;
- компоненти композиції утворюють її своїм об'ємним поєднанням;
- композиція повинна отримати в результаті властивості, яких немає у жодного з її компонентів окремо.

Для композитів, в цілому, характерним є те, що, по-перше, склад і форма компонентів визначені заздалегідь, по-друге, компоненти присутні у пропорціях, які забезпечують задані властивості матеріалів, по-третє, матеріал є однорідним в макромасштабі і неоднорідним в мікромасштабі.

Залежно від виду армуючого компонента композити поділяються на дві групи: дисперсно-зміцнені і волокнисті, які відрізняються структурою, механізмами утворення високої міцності. Перші являють собою матеріал, в матриці якого рівномірно розподілені дрібнодисперсні частинки другої речовини. У цьому випадку все навантаження сприймає матриця, в якій за допомогою безлічі практично нерозчинних в ній частинок другої фази створюється структура, ефективно опірна пластичній деформації. Висока міцність досягається за розміра частинок порядку 10-500 нм, середній відстані між ними 100-500 нм і рівномірному розподілі в матриці. Оптимальний вміст другої фази для різних металів неоднаковий і зазвичай не перевищує 5-10% об'єму.

Композиційні матеріали з волокнистим наповнювачем за механізмом армуючої дії поділяють на дискретні і з безперервними волокнами. Дискретні волокна діаметром від часток до сотень мікрометрів розташовуються в матриці хаотично. Чим більше відношення довжини до діаметру волокна, тим вище ступінь зміцнення.

У композитах на основі полімерних матриць як полімер використовують епоксидні, фенольні, поліуретанові, поліамідні смоли. Ці смоли мають низьку густину, невисоку температуру полімеризації, високу міцність і жорсткість, достатню адгезійну міцність з основними видами армувальних волокон.

Питомі характеристики деяких композитів приведені в табл.1.4. Наведені в табл.1.4 дані не є вичерпними, але вони дають уявлення про високі питомі характеристики міцності, що досягаються у композитах.

Таблиця 1.4. Характеристики композитів з різними матрицями

| Армуючі волокна и структура армування | Щільність, г/см ³ | Міцність при розтягненні, МПа | Модуль пружності за розтягнення, МПа |
|---|---------------------------------|--|--|
| Однонаправлені склопластики на основі волокон з скла ВМ-1 | 2,2 | 2100 | 70 |
| Ортогонально – армований склопластик на основі волокон з скла Е (США) | 1,9 | 500 | 26 |
| Органопластик на основі тканини з армідних волокон Кевлар – 49 | 1,31 | 561 | 40,8 |
| Однонаправлений вуглепластик на основі вуглежгута ВМН-1 | 1,55 | 1000 | 180 |
| Однонаправлений КМ на основі борного волокна | - | 1200 | 250 |
| Трикомпонентний КМ на основі борних (83,5%) і скляних (16,5%) волокон | 1,8 | 1090 | 152 |
| Боралюміній ВКА-1 (50% борних волокон в алюмінієвій матриці АД-33) | — | 1200 | 250 |
| Вуглеалюміній | 2,2 | 1000 | 168 |

Акустичні властивості композитів можуть змінюватись у широкому діапазоні значень внаслідок дії таких чинників.

Розсіювання звуку. Особливості будови композитів (кристалічна структура металів, неспівпадання акустичного імпедансу складових матеріалів матриці і основи композитів) викликають розсіювання ультразвукової енергії. Це

розсіювання перешкоджає надійному виділенню донного луна-сигналу, що обмежує можливості ультразвукового вимірювання товщини.

Загасання і поглинання звуку. Багато органічних матеріалів, наприклад, пластики з малою щільністю, дуже відчутно поглинають ультразвук. З цієї причини максимальна товщина вимірювання виробів з таких матеріалів зменшується. Загасання сигналу збільшується з підвищенням температури і частоти коливань.

Зміна швидкості звуку внаслідок неоднорідності хімічного складу матеріалу, розкиду середньої величини кристалітів (для металів) і властивостей поверхневих шарів (для чавуну за особливо несприятливих умов – до 5 %).

Коефіцієнт загасання для більшості композитів в рази більший ніж для металів, а модуль Юнга і густина матеріалу, навпаки, мають здебільшого менші значення ніж для металів, що визначає особливості застосування ультразвукових методів для контролю композитів [26-30].

Виробництво більшості складних конструкцій з композитів проходить із залученням значної частки ручної праці. Технологія виготовлення часто розробляється для конкретного унікального композиту. Це також призводить до значного розкиду фізико-механічних властивостей виробів і вимагає залучення різних видів НК, включаючи і ультразвуковий, для створення ефективної системи контролю якості продукції.

Перспективи створення композитів конструктивного призначення пов'язані із синтезом матеріалів із елементів, що мають граничні значення властивостей за міцність, тугоплавкістю, термостійкістю тощо. В них використовуються високоміцні елементи (волокна, нитки, дріт, нитковидні кристали, гранули, дисперсні надтверді і тугоплавкі сполуки), що утворюють армування матеріалу, яке скріплюється матрицею з пластичного і міцного матеріалу (металевих сплавів або неметалу, переважно полімеру). Композити за питомими міцністю та модулем пружності можуть на 50...100% перевершувати сталі або алюмінієві сплави за одночасного зниження маси конструкцій до 20...50%.

За останні декілька років композиційні матеріали в Україні зробили величезний крок вперед в плані різноманітності рецептур і областей застосування. До традиційних споживачів цих полімерів додалася велика кількість підприємств, які впровадили і успішно застосовують композити.

Підводячи підсумки розгляду різновидів і властивостей КМ слід відзначити наступне. Несуча спроможність виробів з КМ значною мірою залежить від дотримання їх розмірів у визначених межах. Незважаючи на значний діапазон зміни фізико-механічних характеристик КМ, завдання вимірювання і контролю геометричних розмірів деталей з КМ можна вирішувати методами УЗТ. В цілому, наведені вище особливості КМ можуть суттєво обмежувати точність, чутливість і діапазон ультразвукових вимірювань товщини виробів, що вимагає подальшого удосконалення методів і засобів УЗТ.

1.2 Фізичні принципи лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії

Ультразвукова товщинометрія – це важливий розділ акустичного виду НК. В цілому, акустичний НК ґрунтується на реєстрації параметрів пружних коливань, що виникають або збуджуються в ОК [31]. Методи акустичного контролю у виробництві застосовують до всіх типів матеріалів, які здатні проводити акустичні хвилі без значного загасання: металам та їх сплавам, пластмасам, кераміці, бетону тощо [32-34].

Методи акустичного контролю класифікують за різними ознаками. Всі методи акустичного контролю за характером взаємодії пружних коливань з ОК поділяються на такі групи методів: випромінювання, що пройшло через ОК, відбитого випромінювання (лунаїмпульсний метод), резонансний, імпедансний, вільних коливань та акустико-емісійний. Лунаїмпульсний метод УЗТ належить до другої групи методів.

За первинним інформативним параметром методи УЗНК поділяються на амплітудний, фазовий, часовий, частотний та спектральний.

За способом формування пружних коливань та отримання інформаційного сигналу методи УЗНК поділяються на п'єзоелектричний, електромагніто-акустичний, мікрофонний та порошковий (наприклад, використовується для візуалізації акустичного поля в пластинах за допомогою фігур Хладні [35]).

За діапазоном частот розрізняють ультразвукові методи, що використовують пружні коливання з частотою більше 20 кГц (тобто пружні хвилі ультразвукового діапазону), та власне акустичні чи звукові, які використовують коливання з частотами меншими за 20 кГц.

За характером взаємодії з ОК розрізняють пасивні методи – шумовібраційний, вібраційний, акустичної емісії, та активні методи – ультразвуковий, метод коливань, імпедансний, лунаметод та метод проходження.

Вибір методу акустичного НК залежить від матеріалу ОК, геометричних розмірів та форми виробу та завдання контролю, яке формується перед початком дослідження. Ці методи дають змогу:

- виявляти дефекти матеріалу виробу типу порушення суцільності;
- визначати фізико-механічні властивості і структуру матеріалу ОК (модуль пружності, розмір зерна, відхилення від визначених технологічним процесом режимів термічної та інших видів обробки тощо);
- контролювати геометричні розміри виробів (зокрема, контролювати товщину виробів за можливості доступу до них лише з однієї сторони);

В залежності від умов контролю та завдань товщинометрії, особливостей поширення пружних коливань в ОК розрізняють декілька методів. Класифікації різних методів ультразвукової товщинометрії за різними класифікаційними ознаками наведено в [13, 36]. З поміж інших лунаїмпульсний метод має найбільш повну сукупність корисних характеристик, таких як: інформативність, енергоефективність, економічність, продуктивність, екологічність, можливість проведення контролю без механічного контакту з ОК тощо.

Фізична сутність лунаїмпульсного методу УЗТ ґрунтується на властивості ультразвукових коливань поширюватись у однорідному середовищі

прямолінійно і з постійною швидкістю у вигляді вузького фокусуємого променя та відбиватись від межі розділу матеріалів з різними акустичними властивостями. Ідея методу полягає у випромінюванні в ОК коротких імпульсів пружних коливань і реєстрації інтенсивності амплітуди і часу τ затримки ультразвукового лунасигналу (відбитого сигналу), що пройшов через ОК і відбився від його протилежної поверхні [6, 14, 23, 36-39]. Отже такий метод вимірювання не вимагає необхідності доступу до протилежної поверхні ОК.

Популярність лунаімпульсного методу УЗТ пояснюється достатньою кількістю інформативних параметрів, які можуть бути виміряні [23] – це амплітуда і часовий інтервал, що відповідає затримці на поширення сигналу в ОК, загасання звуку в акустичному тракті, фазовий зсув між випроміненим і прийнятим сигналами, доплерівський зсув частоти і т. ін.

В УЗТ зазвичай використовують сигнали у формі радіоімпульсу. Мінімальна вимірювана товщина виробу визначається довжиною мертвої зони, яка в свою чергу залежить від тривалості зондуючого імпульсу.

Зазвичай для прозвучування ОК в УЗТ використовують поздовжні коливання, оскільки вони, по-перше, мають вищу за зсувні швидкість поширення і, по-друге, є більш простими з огляду на умови збудження і введення в ОК. Основними інформативними параметрами є амплітуда сигналу і час затримки прийнятого сигналу відносно випроміненого (або час затримки між лунасигналами). Вимірюючи часову затримку τ сигналів визначають товщину h ОК за формулою

$$h = 0,5c_l\tau. \quad (1.2)$$

Цим виразом можна користуватись у випадку, якщо значення швидкості c_l відоме. На практиці для визначення c_l виконують налаштування товщиноміра за зразком, виготовленим з того самого матеріалу, або ділянкою ОК з відомою товщиною [23, 37]. Калібрування здійснюють в такий самий спосіб, що й вимірювання товщини, з тією різницею, що товщина вважається відомою (еталонною), тобто що $h = h_{\text{ет}}$, а швидкість – невідомою, тоді

$c_l = 2h_{\text{ет}}/\tau_{\text{ет}}$. Визначивши на етапі калібрування затримку $\tau_{\text{ет}}$, обчислюють кінцевий результат як

$$h = h_{\text{ет}} \frac{\tau}{\tau_{\text{ет}}}. \quad (1.3)$$

Якщо калібрування приладу відбувається з використанням еталонних зразків, які виготовлені з іншого матеріалу зі швидкістю поширення ультразвуку c_l' , і відношення $K = \frac{c_l}{c_l'}$ наперед точне відомо, то результат вимірювання визначається за формулою [23]

$$h = 0,5 \cdot c_l \tau = 0,5 \cdot K c_l' \tau. \quad (1.4)$$

Зазвичай для налаштування приладу застосовують стандартні зразки підприємства [38], що виготовляють з матеріалу ОК. Основні вимоги до зразків: коректне відтворення швидкості звуку, форми і стану поверхні. Наприклад, якщо ставиться завдання вимірювання товщини ОК з лакофарбним покриттям, зразок повинен мати аналогічне покриття. У тих випадках, коли ОК має малий радіус кривизни (менше 50 мм) або складну криволінійну форму поверхні (гиби труб), застосовують зразки у вигляді фрагментів відповідних виробів.

Пряме і зворотне перетворення електричних сигналів в пружні коливання найчастіше здійснюється за допомогою п'єзоперетворювачів [40-44] або із застосуванням електромагніто-акустичних перетворювачів [45]. Застосування перших передбачає використання контактної рідини між перетворювачем і ОК для кращого акустичного контакту, а в другому випадку введення ультразвуку в ОК здійснюється через «сухий» контакт. Зазвичай в УЗТ для збудження поздовжніх хвиль використовують прямі суміщені або роздільно-суміщені п'єзоелектричні перетворювачі.

В ОК з паралельними поверхнями спостерігається не одне відлуння від його нижньої поверхні, а за достатнього часу спостереження та незначного загасання ультразвуку в матеріалі ОК – серія віддзеркалень з однаковим часовими затримками [23], що показано на рис.1.1.

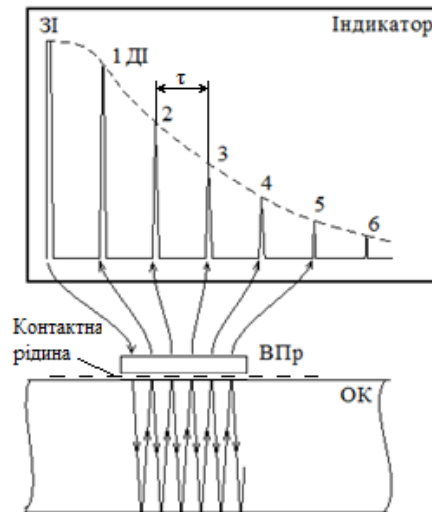


Рис. 1.1. Утворення серії донних імпульсів під час прозвучування пластини:

1,2,3,4,5,6 – донні імпульси (ДІ), ЗІ – зондуєчий імпульс,

ВПр – випромінювач-приймач

Оскільки часовий інтервал між зондуєчим і першим донним імпульсом містить нестабільний час затримки на поширення сигналу в шарі контактної рідини, значення τ зазвичай визначають як інтервал між донними імпульсами.

З метою отримання донних сигналів якомога більшої амплітуди, зазвичай перетворювачі розраховують на роботу у ближній зоні (зоні Френеля). Оскільки часовий інтервал між всіма суміжними донними імпульсами дорівнює τ , тому отримання і врахування більшої кількості донних імпульсів дає можливість підвищити точність вимірювання часового інтервалу за рахунок усереднення (тобто за рахунок визначення інтервала між першим і k -тим імпульсами). Отримання «довгої» серії донних імпульсів ускладнюється не тільки за рахунок загасання сигналів в електроакустичному тракті товщиноміра, але й за рахунок значних шумів і завад, на фоні яких спостерігаються донні сигнали.

Той факт, що багатократні відлуння послідовно зменшуються за амплітудою, пояснюється тим, що інтенсивність променя в часі зменшується через загасання і розсіювання, а також через розширення самого променя. Аналітично амплітуди донних сигналів визначаються за допомогою коефіцієнта ослаблення акустичного тракту $K_{a.t.}$ (або просто коефіцієнта акустичного тракту)

[23]. Під акустичним трактом розуміють шлях ультразвукової хвилі від випромінювального до приймального перетворювача. Кількісно $K_{a.t.}$ дорівнює відношенню акустичного тиску p_{Π} в приймальному перетворювачі до акустичного тиску $p_{\text{В}}$ у випромінювальному перетворювачі, які виникають в процесі випромінювання/приймання сигналів.

Для представленої на рис.1.1 моделі прозвучування ОК, за умови нормального введення ультразвуку в ОК та роботи у ближній зоні ($2h < r_{\text{бл}}$, де $r_{\text{бл}}$ – границя ближньої зони) променева картина акустичного тракту представлена на рис.1.2.

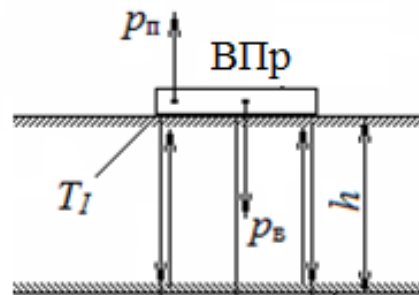


Рис. 1.2. Променева картина акустичного тракту ультразвукового лунаїмпульсного товщиноміра

За умови нехтовно тонкого шару контактної рідини, роботи перетворювача у близькій зоні і того, що відбивач являє собою плоску поверхню більшу за площею ніж ВПр, тобто повністю перекриває акустичний тракт, коефіцієнт акустичного тракту для першого донного імпульса визначається як

$$K_{a.t.} = \frac{p_{\Pi}}{p_{\text{В}}} = 0,8 \cdot T_I \cdot R_p \cdot e^{-2h\alpha_p}, \quad (1.5)$$

де T_I – коефіцієнт проходження пружних коливань через границю двох середовищ за інтенсивністю, R_p – коефіцієнт відбиття пружних коливань через границю двох середовищ за тиском, α_p – коефіцієнт загасання пружних коливань в середовищі ОК за тиском. Коефіцієнти T_I та R_p визначаються через акустичні імпеданси середовищ випромінювача/приймача та ОК

$$T_I = \frac{4z_1z_2}{(z_1+z_2)}, \quad (1.6)$$

$$R_p = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}. \quad (1.7)$$

Інколи до акустичного тракту товщиномірів включають ультразвукові лінії затримки з метою зменшення мертвої зони (тобто з метою усунення накладання в часі зондуючого і донного імпульсів у разі вимірювання тонких ОК). В цьому випадку загасання в лінії затримки необхідно додатково враховувати у коефіцієнті $K_{a.t.}$ (1.4).

В практиці УЗТ для оцінювання електричних сигналів товщиномірів користуються поняттям «електроакустичний тракт» (ЕАТ). Останній являє собою сукупність п'єзоелектричних (одного чи двох) перетворювачів та акустичного тракту ОК. Така система, розглядається як лінійна, що вносить загасання і затримку у відбитий сигнал. Основною кількісною оцінкою ЕАТ є його коефіцієнт, що дорівнює відношенню електричних сигналів на виході приймаючого і випромінюючого перетворювачів. Коефіцієнт ЕКТ визначається добутком $K_{a.t.}$ та коефіцієнтами електромеханічного перетворення ультразвукових перетворювачів.

В лунаїмпульсній товщинометрії відомий і інший метод – безеталонний лунаїмпульсний метод УЗТ [23, 46]. Цей метод не потребує калібрування на еталонних зразках, точніше, таке калібрування виконується автоматично у допоміжному ультразвуковому каналі одночасно з визначенням часового інтервалу у вимірювальному каналі. Його сутність полягає у наступному: разом з поздовжньою хвилею в ОК випромінюється головна хвиля, яка поширюється вздовж поверхні виробу на точно відому відстань і потрібний на це поширення час $\tau_{ет}$ додатково вимірюється. Головні хвилі (поверхнево поздовжні) поширюються під поверхнею ОК під кутом $\sim 12...15^\circ$. Використовуючи той факт, що швидкості поздовжньої c_l і головної c_r хвиль наближено можна вважати рівними, тобто $c_l \approx c_r$, визначення товщини виробу здійснюється за формулою (1.3).

Реалізація цього методу потребує спеціальних двоелементних п'єзоелектричних перетворювачів [23, 46]. Їх розташування на ОК та структура отримуваних сигналів наведені відповідно на рис.1.3 а,б.

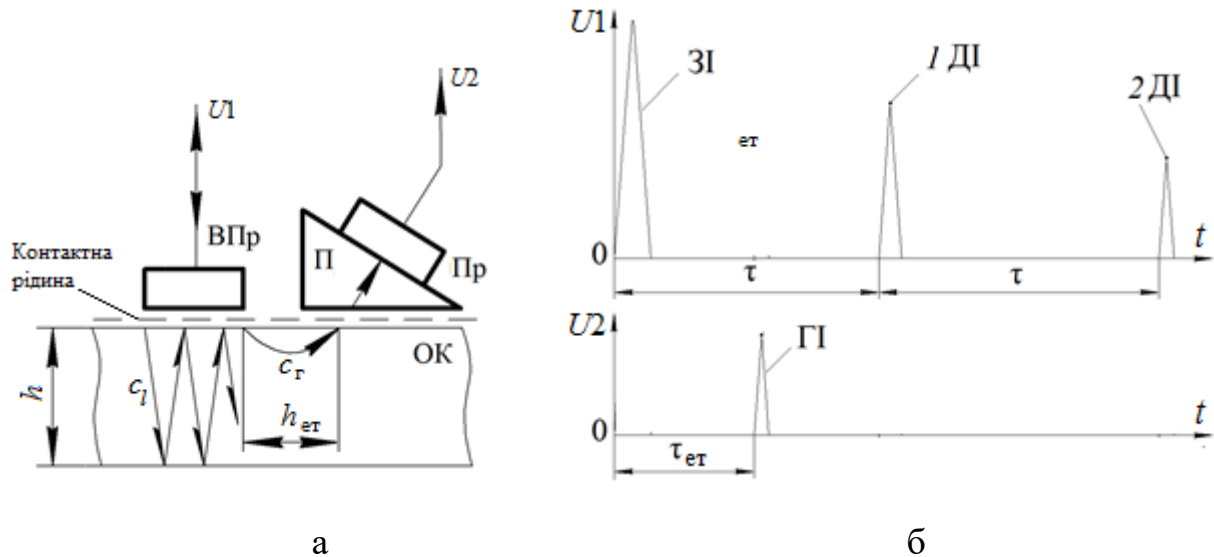


Рис. 1.3. Ілюстрація ідеї безеталонного методу УЗТ:

а – розташування п'єзoeлементів на ОК; б – графіки отримуваних сигналів

Перший елемент ВПр виконує такі функції: здійснює збудження поздовжньої хвилі в ОК, приймання донних сигналів та збудження головної хвилі. Останній процес пояснюється тим, що за кромки ВПр частина сигналу входить в ОК під невеликим кутом (близьким до першого критичного кута). Приймач Пр розташований на призмі П, чим забезпечуються найкращі умови для прийняття головних хвиль. Елементи ВПр та Пр розташовуються на фіксованій відстані $h_{ет}$ один від одного та екрануються електрично та акустично.

Лунаїмпульсний метод товщинометрії має і інше важливе практичне застосування. Якщо товщина виробу відома з високою точністю, то є можливість за часовим інтервалом визначити через виміряну швидкість c_l пружні константи [23, 37]. Зокрема модуль Юнга $Y^{Ю}$ для більшості матеріалів визначається як:

$$c_l = \sqrt{\frac{Y^{Ю}}{\rho}}, \rightarrow Y^{Ю} = \frac{4h_{ет}^2 m}{\tau_{ет} V}, \quad (1.8)$$

де ρ , m , V – відповідно густина, маса та об'єм матеріалу ОК.

В матеріалах з анізотропією швидкість звуку може залежати від напрямку поширення, змінюватись внаслідок зміни структури речовини, наявності домішок та внутрішніх і зовнішніх напружень у матеріалі.

Вибір частоти коливань в лунаїмпульсному методі товщинометрії зазвичай обирається з умови досягнення компромісу між високою роздільною здатністю (її підвищення потребує підвищення частоти) та низьким загасанням коливань (для зменшення загасання необхідно зменшувати частоту коливань). Найбільш вживаним діапазоном частот ультразвукових лунаїмпульсних товщиномірів є діапазоні від 1,0 до 10,0 МГц.

Аналіз останніх публікацій з питань УЗНК засвідчив, що актуальними напрямками подальшого розвитку ультразвукового лунаїмпульсного методу УЗТ є:

- розробка нових способів обробки вимірювальної інформації;
- розробка нових типів перетворювачів пружних коливань (електромагніто-акустичних перетворювачів, лазерних збудників і приймачів пружних коливань, фазованих антенних ґраток, широкосмугових п'єзоперетворювачів і т.і.);
- розробка та застосування нових методів обробки інформаційних сигналів, пошук нових для УЗНК інформаційних параметрів сигналів, методів відстроювання від шумів тощо;
- покращення метрологічних характеристик засобів УЗТ;
- розробка прецизійних засобів вимірювання швидкості ультразвукових хвиль.

1.3 Сучасний стан розвитку апаратних засобів лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії

В залежності від типу ОК, мети дослідження та точності вимірювання ультразвукові товщиноміри умовно поділяються на три групи [47]:

- прилади ручного контролю виробів з гладкими плоско-паралельними поверхнями;
- прилади ручного контролю виробів з грубими непаралельними поверхнями;
- прилади автоматичного контролю виробів у технологічному потоці.

Незалежно від групи всі ультразвукові лунаїмпульсні товщиноміри мають багато спільних рис. Узагальнена структура такого товщиноміра [23] наведена на рис.1.4.

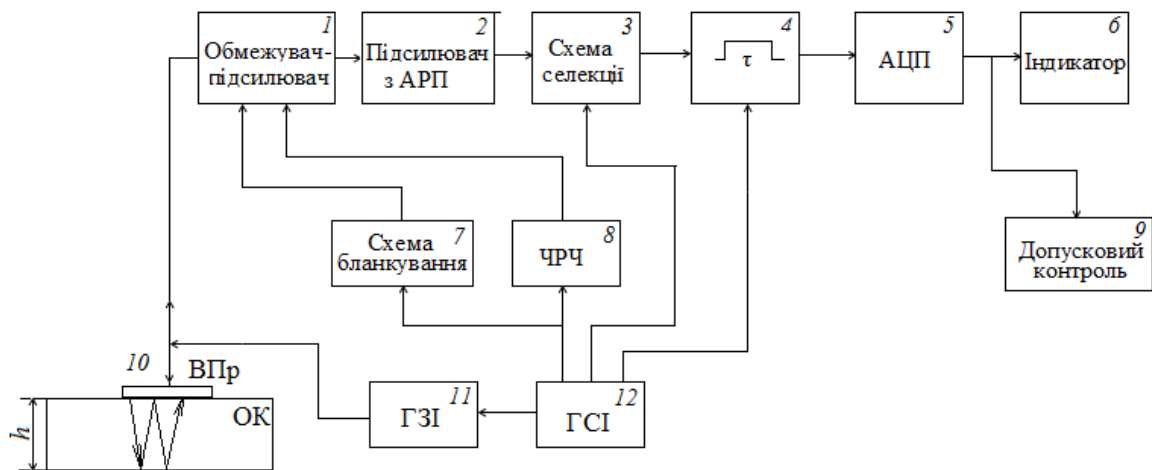


Рис. 1.4. Узагальнена структурна схема лунаїмпульсного товщиноміра з еталонуванням включно з розташуванням ВПр на ОК

Схема працює наступним чином. Генератор синхронізуючих імпульсів (ГСІ, 12) забезпечує синхронізацію роботи вузлів товщиноміра, реалізуючи імпульсний режим випромінювання/приймання ультразвукових коливань. Генератор зондуючих імпульсів (ГЗІ, 11), формує електричні сигнали для збудження ультразвукових коливань у перетворювачі (ВПр, 10). З метою формування короткотривалого ультразвукового сигналу смуга пропускання перетворювача розширена в область високих частот. За наявності акустичного контакту височастотні механічні коливання вводяться в ОК. Віддзеркалені від нижньої межі розділу «ОК – повітря» коливання перетворюються в

п'єзоперетворювачі в електричні сигнали, що надходять на вхід приймально-підсилювального тракту товщиноміра.

Цей тракт включає такі послідовно з'єднані блоки:

- широкосмуговий підсилювач високої частоти з діодним обмежувачем на вході і низьким вихідним опором (1);
- широкосмуговий підсилювач з автоматичним регулюванням підсилення (АРП, 2), необхідний для стабілізації амплітуди донного імпульсу;
- схему селекції імпульсів за якими визначається початок і закінчення вимірюваного часового інтервалу (3);
- блок формування вимірювального інтервалу (4);
- блок аналого-цифрового перетворення (АЦП, 5) вимірювального часового інтервалу в цифровий код;
- блок цифрової індикації (6);

Крім того схема товщиноміра включає: блок захисту від завад (7), що здійснює бланкування (вимкнення) вхідного підсилювача на час вимірювального циклу; блок часового регулювання чутливості (ЧРЧ, 8) для часового управління коефіцієнтом підсилення підсилювача 1 за законом оберненим до експоненти для того, щоб амплітуда луна-сигналу мало залежала від товщини ОК (спільно з блоком 2 стабілізує амплітуду луна-сигналів); блок допускового контролю (9), який, в разі потреби, сигналізує про вихід товщини ОК за межі встановленого допуску.

У випадку вимірювання надмалих часових інтервалів до складу приймально-підсилювального тракту може бути введений блок лінійної трансформації часового інтервалу.

В схемі на рис.1.4 реалізовано амплітудний метод вимірювання часових інтервалів, який передбачає їх визначення за обвідними донних імпульсів.

Загальні вимоги до ультразвукових товщиномірів і їх складових викладені в роботах [47-50]. Одним з основних показників якості товщиномірів є їх похибка вимірювання. Похибка вимірювання для луна-імпульсних товщиномірів з

амплітудним методом визначення часового інтервалу визначаються двома основними факторами [23]:

- методом вимірювання товщини і характером акустичного тракту (похибки формування вимірювального інтервалу, перетворення вимірювального інтервалу в аналогову величину тощо);
- апаратним рішенням (похибки аналого-цифрового перетворення, похибки коефіцієнтів передачі вузлів товщиноміру тощо).

Процес вимірювання інтервалу часу τ супроводжується виникненням похибок методичного і інструментального характеру. Відносна похибка результату вимірювання товщини в загальному виді визначається як [23]:

$$\frac{\Delta h}{h} = 2 \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{\Delta A_{A-A}}{A_{A-A}} + \frac{\Delta N}{N} \right), \quad (1.9)$$

де Δh – абсолютна похибка вимірювання товщини ОК,

$\Delta \tau$ – абсолютна похибка формування часового вимірювального інтервалу,

$$\Delta \tau = \Delta \tau_1 + \Delta \tau_2 + \Delta \tau_3, \quad (1.10)$$

де $\Delta \tau_1$ – сумарна абсолютна похибка формування інтервалу часу, $\Delta \tau_2$ – похибка проходження через контактну рідину між ОК і ПЕП, $\Delta \tau_3$ – похибка від нестабільності швидкості звуку в ОК;

$\frac{\Delta \tau}{\tau}$ – відносна похибка формування вимірювального інтервалу;

$\frac{\Delta A_{A-A}}{A_{A-A}}$ – відносна похибка перетворення аналог-аналог для обвідної сигналу;

$\frac{\Delta N}{N}$ – відносна похибка аналого-цифрового перетворення.

Потенційну точність вимірювання ультразвукових товщиномірів визначають за похибкою формування вимірювального інтервалу, решта складових загальної похибки має узгоджуватись з нею. Для підвищення точності визначення товщини здійснюють вимірювання часових інтервалів між несуміжними лунаїмпульсами. Це дозволяє дещо зменшити похибки вимірювання за рахунок усереднення і вилучення вимірюваного інтервалу часу затримки, яка викликана шаром контактної рідини [14, 23]. Подальше

підвищення точності вимірювання h неможливе без більш повного врахування ймовірнісного характеру прийнятих сигналів, використання більш складних методів опрацювання сигналів, зокрема використання особливостей їх фазових характеристик.

Уявлення про стан розвитку засобів ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії дає табл.1.5, в якій подано основні технічні характеристики сучасних ультразвукових товщиномірів провідних світових виробників.

Таблиця 1.5. Технічні характеристики сучасних ультразвукових лунаїмпульсних товщиномірів

| Найменування характеристики | Назва, виробник, країна | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | Pocket MIKE, GE Inspection Technologies, США | DMS2, DMS 2TS, GE Inspection Technologies, США | CL400, GE Inspection Technologies, США | УДТ-08, НВЦ «Крокус» РФ | T-Scope III, StressTel, США | Alfagage, Sonatest, Великобританія | DMS2, Krautkrammer, Німеччина | 36DL PLUS, Panametrics, США |
| Діапазон товщин, мм | 1,0...250 | 0,2...635 | 0,13...760 | 0,6...300 | 0,25...508 | 0,6...500 | 0,66...635 | 0,5...500 |
| Швидкість звуку, м/с | 1000...9999 | 1000...9999 | 0,1...19999 | Не вказано | 1000...9999 | 2000...9999 | 1000...9999 | 762...13999 |
| Роздільна здатність, мм | 0,01 до 99,99; 0,1 вище | 0,01 або 0,1 | 0,01 або 0,1 за вибором | 0,01 або 0,1 за вибором | 0,01 | 0,01 | 0,01 або 0,1 | 0,01 або 0,1 |
| Похибка | не вказана | не вказана | не вказана | $\pm (0,01 + 0,01 \cdot dx)$, де dx – товщина вим. зразка | не вказана | не вказана | не вказана | не вказана |
| Смуга частот, МГц | 5 | 0,5...15 | 1,5...28 | 5, 10 | 0,5...22 | 1...75 | 0,5...15 | 1...15 |
| Перетворювачі | Вбудований | Роздільно-суміщені, суміщені | Роздільно-суміщені, суміщені | Роздільно-суміщені, суміщені | Роздільно-суміщені, суміщені | Роздільно-суміщені, суміщені | Роздільно-суміщені, суміщені | Роздільно-суміщені, суміщені |
| Наявність А-скану | немає | немає | є | немає | є | є | є | є |

Аналіз характеристик ультразвукових лунаїмпульсних товщиномірів та інших матеріалів [7, 9, 38] дозволяє визначити основні тенденції розвитку цих приладів:

1. розширення діапазону вимірювання;
2. розширення номенклатури матеріалів, що витікає з розширення діапазону швидкостей ультразвуку. Наприклад, прилад CL 400, забезпечує

роботу в діапазоні швидкостей від 0,1 до 20 000 м/с. Це дає змогу контролювати одним приладом ОК з різних матеріалів – бетону, рідин, конструкційної кераміки, металів тощо;

3. розширення функціональних можливостей. Більшість приладів має в своєму складі мікропроцесорні блоки, які реалізують різні алгоритми цифрового опрацювання сигналів, документування результатів контролю, передавання даних в комп'ютерну мережу для інших користувачів. Переважна більшість приладів потребує калібрування під час проведення вимірювань.

Наведені в табл.1.5 дають загальне уявлення про досягнуті на сьогодні технічні характеристики таких приладів УЗНК. Проте, ці дані й інші доступні в періодичних наукових виданнях відомості про ультразвукові лунаїмпульсні товщиноміри мають здебільшого рекламний характер, орієнтовані на досягнення комерційного успіху і не розкривають або приховують реальні можливості апаратури. Зокрема, відсутні дані про межу співвідношення сигнал/шум, за якої досягаються заявлені показники точності, час вимірювання, коефіцієнт загасання матеріалу ОК, алгоритми опрацювання даних, можливості підвищення точності вимірювання за рахунок статистичного опрацювання експериментальних даних і т. і. Це обмежує можливості об'єктивного оцінювання наведених технічних характеристик та умов їх досягнення, унеможлиблює проведення коректного співставного аналізу апаратури різних виробників.

1.4 Методи формування вимірювальних часових інтервалів в ультразвукових лунаїмпульсних товщиномірах

В сучасних ультразвукових товщиномірах використовують різні методи формування вимірювальних часових інтервалів в залежності від умов проведення, матеріалу ОК і завдань контролю, ознак та характеристик сигналу УЗТ, які проаналізовані нижче.

1. Реєстрація першого/максимального виявленого сигналу. Суть методу полягає в наступному: за наявності у вимірювальному стробі одночасно

декількох сигналів проводиться реєстрація першого або максимального прийнятого сигналу в залежності від його форми.

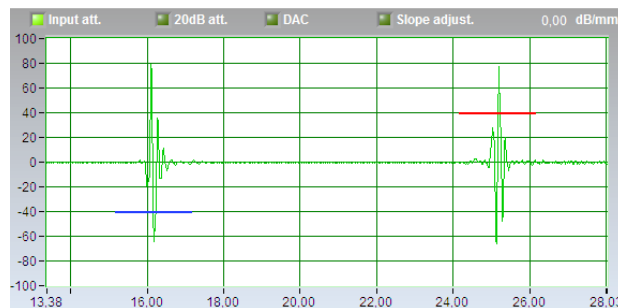
2. Фіксація та визначення вимірюваного інтервалу за обраною напівхвилею. Сучасні УЗ товщиноміри мають функцію налаштування вимірювальних стробів, що дозволяє обрати спосіб реєстрації і визначення параметрів вимірюваних сигналів:

- за позитивною на півхвилею сигналу-носія;
- за негативною на півхвилею сигналу-носія;
- за радіосигналом (за обома на півхвилями сигналу-носія).

Дана функція дозволяє обрати напівхвилю сигналу-носія, за якою буде здійснюватися виділення вимірюваного часового інтервалу (рис.1.5,а).



а



б

Рис. 1.5. Скріншот екрану ультразвукового товщиноміра, що ілюструє процес налаштування вимірювальних стробів:

а – за двома донними сигналами, б – за зондуєчим та донним сигналами

Це дає змогу дещо зменшити похибку формування часового інтервалу, яка зумовлена кінцевими тривалістю радіоімпульсного сигналу та швидкістю наростання/спаду його обвідної. Наявність даної функції пояснюється

використанням спеціалізованих, призначених виключно для УЗТ, п'єзоелектричних перетворювачів з несиметричними короткими за тривалістю сигналами (внаслідок конструктивних особливостей, підсиленого демпфування, яке потрібне для скорочення імпульсу тощо).

В ряді випадків вимірюванні товщини ОК, виготовлених з матеріалів зі значним коефіцієнтом загасання ультразвуку, визначення часових інтервалів може здійснюватися за зондуючим та першим донним сигналами (рис. 1.5, б.). Відомо, що у випадку відбивання сигналу від границі поділу твердої та «м'якої» поверхонь фаза сигналу-носія змінюється на 180° . Для уникнення похибки вимірювання, яка обумовлена цим ефектом, застосовується режим виділення часового інтервалу за протилежними на півхвилями сигналу-носія, наприклад, за позитивною для зондуючого та негативною для донного сигналів чи навпаки, в залежності від форми імпульсів. Можливий варіант з визначенням часових інтервалів за вказаними двома способами з наступним усередненням отриманих результатів.

3. Вимірювання товщини з використанням мульти-лунасигналів [23].

Вимірювання проводиться між першим та одним з багаторазово відбитих донних сигналів, наприклад, між першим і третім. Для підвищення точності рекомендується обрати максимально віддалений донний сигнал. В цьому випадку середньоквадратичне значення похибки виділення часового інтервалу зменшується наближено в \sqrt{n} разів, де n – кількість врахованих часових проміжків між першим і останнім донними сигналами.

4. Використання апріорної інформації про діапазон вимірювання.

Зазвичай, при формулюванні завдання вимірювання попередньо відоме номінальне значення товщини ОК та допуски на нього. Це дозволяє оцінити загальний діапазон можливих значень вимірюваних товщин, обмежений певними мінімальним та максимальним значеннями. Якщо під час проведення процесу вимірювання товщини отримане поточне значення знаходиться за межами вказаного діапазону, то воно вважається таким, яке містить грубу похибку вимірювання та ігнорується.

5. Усереднення результатів вимірювання.

Однією з найбільш поширених операцій з опрацювання в УЗТ є усереднення результатів багаторазових вимірювань. Зрозуміло, що цей процес призводить до підвищення точності, оскільки результати окремих вимірювань мають випадкові як позитивні, так і негативні відхилення від точного значення і тому частково взаємно компенсуються. Зі збільшенням числа вимірювань середнє значення позитивних відхилень наближається по модулю до середнього значення негативних відхилень і точність їх взаємної компенсації поліпшується.

6. Використання методів вимірювання, які ґрунтуються на формуванні часової мітки. Суть таких методів полягає у вимірюванні інтервалу часу між випромєненням і прийнятим сигналами за моментами часу їх перетину обраного порогового рівня. Для будь-якого методу вимірювання часового інтервалу, який використовує часові мітки, точність вимірювань погіршується через вплив шумів із зменшенням амплітуди вимірюваних сигналів. Нелінійні спотворення сигналів із занадто великою амплітудою також призводять до зниження точності формування часових інтервалів [51].

Розглянемо більш детально різновиди цього методу.

- Метод прив'язки за фронтом сигналу.

Згідно з цим методом проміжок часу фіксується за моментами перетину фронтом сигналів заданого порогового рівня (рис. 1.6, вар.1) [52, 53].

Прив'язка по передньому фронту імпульсу здійснюється за допомогою порогового пристрою, який спрацьовує у випадку досягнення вхідним сигналом рівня дискримінації. Внаслідок цього генерується логічний імпульс, який фіксує момент появи сигналу, і, відповідно, момент його реєстрації приладом. Зрозуміло, що імпульси більшої амплітуди перетинають рівень дискримінації раніше, ніж імпульси меншої амплітуди. Чим нижче поріг, тим точніше часова прив'язка імпульсів. Для уникнення фальшивих спрацювань амплітуда вхідного сигналу повинна значно перевищувати середньо-квадратичний рівень шуму.

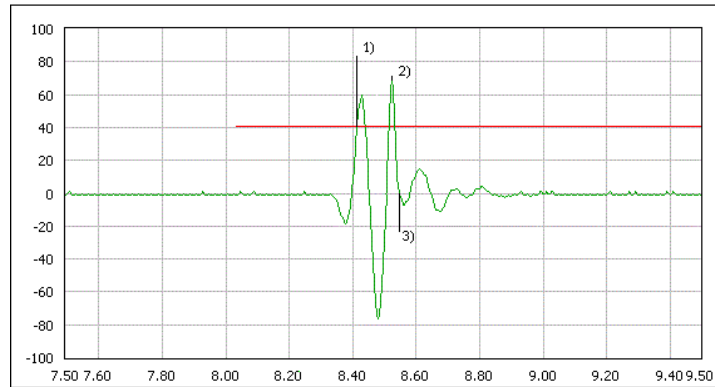


Рис. 1.6. Графічна ілюстрація процесу формування часових міток при вимірюванні товщини: 1 – метод прив'язки по фронту, 2 – метод пікового сигналу 3 – метод перетину нуля

Перевагами даного методу є простота конструктивних рішень і пов'язані з цим надійність, компактність і економічність. Похибка такого методу часової прив'язки тим більше, чим ширше динамічний діапазон вхідних імпульсів. Зі зменшенням порогу похибка часової прив'язки зменшується.

- Метод перетину нуля.

Суть методу полягає в тому, що як тільки прийнятий імпульс перевищує пороговий рівень (рис. 1.6, вар. 3), прилад виводить інформацію про те, що ультразвуковий сигнал було виявлено [52, 53]. Далі вимірювання часової затримки проводиться в момент першого переходу через нульове значення після моменту виявлення максимуму сигналу у стробі. Головна перевага даного способу вимірювань полягає в тому, що визначений час затримки не залежить від амплітуди сигналу. Якщо сигнал перевищив пороговий рівень, вимірювання відбувається автоматично. Основним фактором появи похибки вимірювання часового інтервалу даним методом, є шуми і фонові імпульси.

- Метод пікового сигналу.

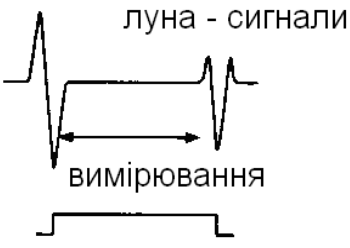
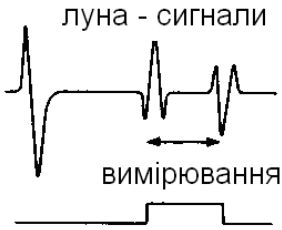
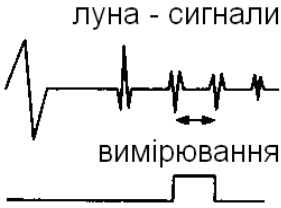
Вимірювання затримки проводиться в момент фіксації пікового (максимального) значення сигналу у стробі, який перевищує пороговий рівень (рис. 1.6, вар. 2).

- Метод відстежуючого порогу.

Даний метод полягає в тому, що формувач спрацьовує у випадку досягнення вхідним сигналом рівня, що дорівнює попередньо заданій фіксованій частині його амплітуди. Це дозволяє здійснити часову прив'язку практично до будь-якої точки фронту вхідного імпульсу і ввести поправку на час наростання сигналу в широкому діапазоні амплітуд. Недолік методу є залежність точності вимірювання від форми прийнятого сигналу.

Рекомендації стосовно доцільності використання різних методів УЗТ наведені у вигляді таблиці в роботі [54] (див. табл.1.6).

Табл. 1.6. Режими прецизійного ультразвукового вимірювання товщини

| Зображення луна-сигналу | Типи ПЕП | Діапазон вимірювань товщини, мм | Похибка вимірювань, мм |
|---|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
|  | Прямий суміщений | 0,5 ÷ 2500 | ±0,01 |
|  | З призмою, імерсійний | 0,3 ÷ 100 | ±0,002 |
|  | З призмою, імерсійний | 0,1 ÷ 40 | ±0,002 |

7. Використання особливостей фазових характеристик сигналів луна-імпульсного методу УЗТ. Цей метод запропоновано для вимірювання

товщини багат шарових виробів. Ідея методу викладена в роботах [55, 56], а його розвиток поданий в [13, 57]. Сутність методу полягає в наступному.

Досліджуваний виріб прозвучується за допомогою поздовжніх ультразвукових хвиль. Внаслідок малої товщини поверхневого шару відбувається суміщення в часі зонduючого і донного (або накладання донних імпульсів), що призводить до спотворення фазової характеристики сигналів (ФХС), тобто спотворення залежності фази сигналу від часу. Наприклад, якщо використовується радіоімпульсний зонduючий сигнал з гармонічним сигналом-носієм, фазова характеристика неспотвореного сигналу є лінійною функцією часу. Фазу сигналу можна отримати на основі використання перетворення Гільберта [55, 58].

У випадку суміщення в часі донного і зонduючого сигналів значення ФХС сумарного сигналу будуть мати стрибок у межах $\pm\pi$. Виявлення цього стрибка та визначення його часового положення дозволяє оцінити затримку розповсюдження ультразвукового сигналу в ОК. Процес формування стрибка фази сигналів УЗТ та визначенні моменту її спотворення наведені на рис. 1.7.

Внаслідок суміщення в часі гармонічних сигналів однієї частоти відбувається фазова маніпуляція сигналу-носія. В цілому, фазоманіпульовані сигнали (ФМ-сигнали) мають ряд переваг і використовуються у зв'язку [59] для завадостійкого кодування і передавання інформації, у радіолокації [59] для підвищення відношення сигнал/шум під час приймання відбитих від повітряної цілі сигналів. Відомі приклади застосування ФМ-сигналів і в УЗНК [61-63]. В цих роботах використана ідея використання кодів Баркера для стиснення ФМ-сигналів. В такому варіанті реалізації спосіб потребує використання зонduючих сигналів суттєво збільшеної тривалості, що призводить до відповідного розширення мертвої зони під час дослідження ОК.

8. Використання дисперсії фазових зсувів сигналів для ультразвукового вимірювання товщини виробів. Даний метод запропоновано для вимірювання товщини виробів, що виготовлені з матеріалів зі значним загасанням. Ідея методу викладена в роботах [55, 64], а його поглиблене дослідження – в [14].

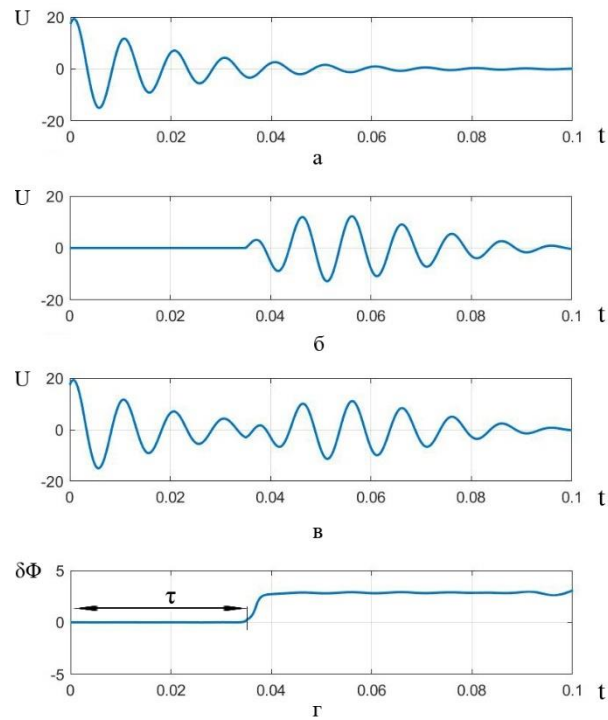


Рис. 1.7. Графіки, що ілюструють спосіб ультразвукового вимірювання товщини багат шарових матеріалів за стрибком значень фазової характеристики сигналу УЗТ:

а – зонduючий сигнал, б – відбитий сигнал, в – суперпозиція зонduючого і відбитого сигналів, г – різниця фазових характеристик суперпозиції сигналів зі стрибком та сигналу-носія

Сутність методу полягає в наступному.

Акустичний зонduючий радіоімпульсний сигнал вводять в ОК, приймають відбитий сигнал після його розповсюдження в ОК, визначають фазову характеристику відбитих сигналів, обчислюють різницю цієї характеристики і фази сигналу-носія. Отриману різницю піддають ковзній віконній обробці, для кожного положення вікна визначають кругову дисперсію V (або зв'язану з нею характеристику – вибіркoву довжину вектора, або r -статистику, $V = 1 - r$) [14, 65-67], а час розповсюдження сигналу в ОК знаходять за її мінімумами (або максимумами для r -статистики). Процес формування кругової статистики (або r -статистики), та його ефективність порівняно з формуванням часових інтервалів за обвідною наведено на рис. 1.8.

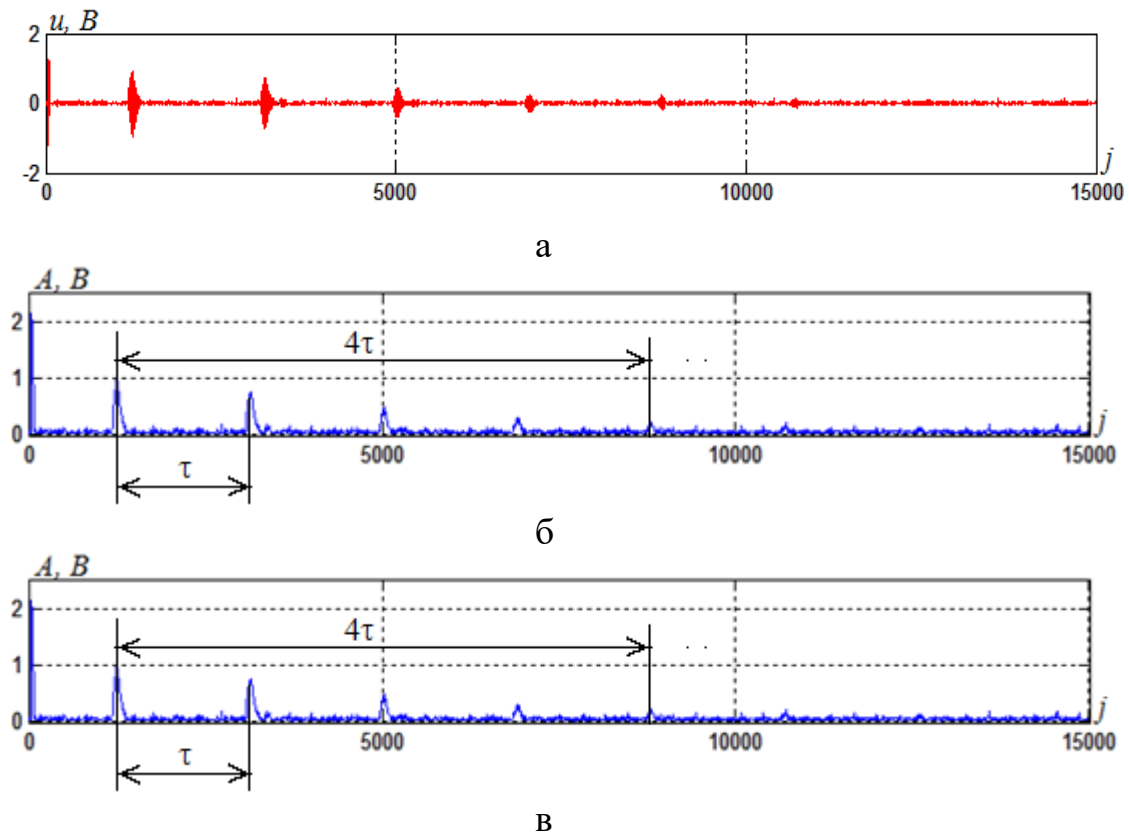


Рис. 1.8. Графічне представлення результатів модельних досліджень методу УЗТ на основі використання дисперсії фазових зсувів сигналів: а– графік сигналу УЗТ; б – графік обвідної сигналу УЗТ; в – графік статистики r .

З рис. 1.8 видно, що за умови значного загасання сигналу в матеріалі ОК фазовий метод порівняно з амплітудним дозволяє визначити більшу кількість донних імпульсів і на цій основі підвищити ефективність методу мульти-лунасигналів для підвищення точності вимірювання часових інтервалів. Проте можливості цього методу для УЗТ не повністю використані, що потребує його подальшого удосконалення.

Таким чином можна констатувати, що стрибок фази ФМ-сигналів, як інформаційна ознака сигналу, є надзвичайно стійкою до дії шумів, а використання її особливостей в УЗТ потребує подальших досліджень.

1.5 Постановка завдань дослідження

З виконаного аналізу завдань УЗТ та сучасного стану розвитку цієї галузі неруйнівного контролю витікає, що на сьогоднішній день існує протиріччя між

інформаційними можливостями лунаїмпульсного методу УЗТ та використовуваними спрощеними моделями тестових сигналів і способами здобуття вимірювальної інформації про інтервали часової затримки донних сигналів. Існуючі методи та засоби УЗТ не дозволяють розв'язати це протиріччя.

Аналіз можливих шляхів подолання цього протиріччя дозволив сформулювати науково-технічну задачу роботи, яка полягає у підвищенні точності вимірювання товщини виробів з конструкційно-міцних матеріалів за рахунок використання фазоманіпульшованих тестових сигналів та їх опрацювання методами статистичної фазометрії.

До числа невирішених теоретичних задач належать наступні:

- дослідження можливостей використання фазоманіпульшованих сигналів в системах лунаїмпульсної УЗТ;
- розробка нового методу лунаїмпульсної УЗТ, орієнтованого на використання тестових сигналів з маніпуляцією фази сигналу-носія;
- удосконалення методу статистичної фазової УЗТ, який ґрунтується на використанні r -статистики.

До числа актуальних інженерно-технічних задач належать:

- проведення модельних комп'ютерних експериментів з метою дослідження можливостей застосування розробленого методу лунаїмпульсної УЗТ за умови дії різних впливаючих факторів;
- розробка макета системи лунаїмпульсної УЗТ з покращеними метрологічними характеристиками та виконання на ньому експериментальних досліджень;
- експериментальне дослідження процесу проходження ФМ-сигналів в електроакустичних трактах УЗТ;
- розробка алгоритмічно-програмного забезпечення розробленої системи;
- розробка методики визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів для нової фазової системи УЗТ.

Викладене вище зображено на рис.1.9 в узагальненому наочному вигляді.

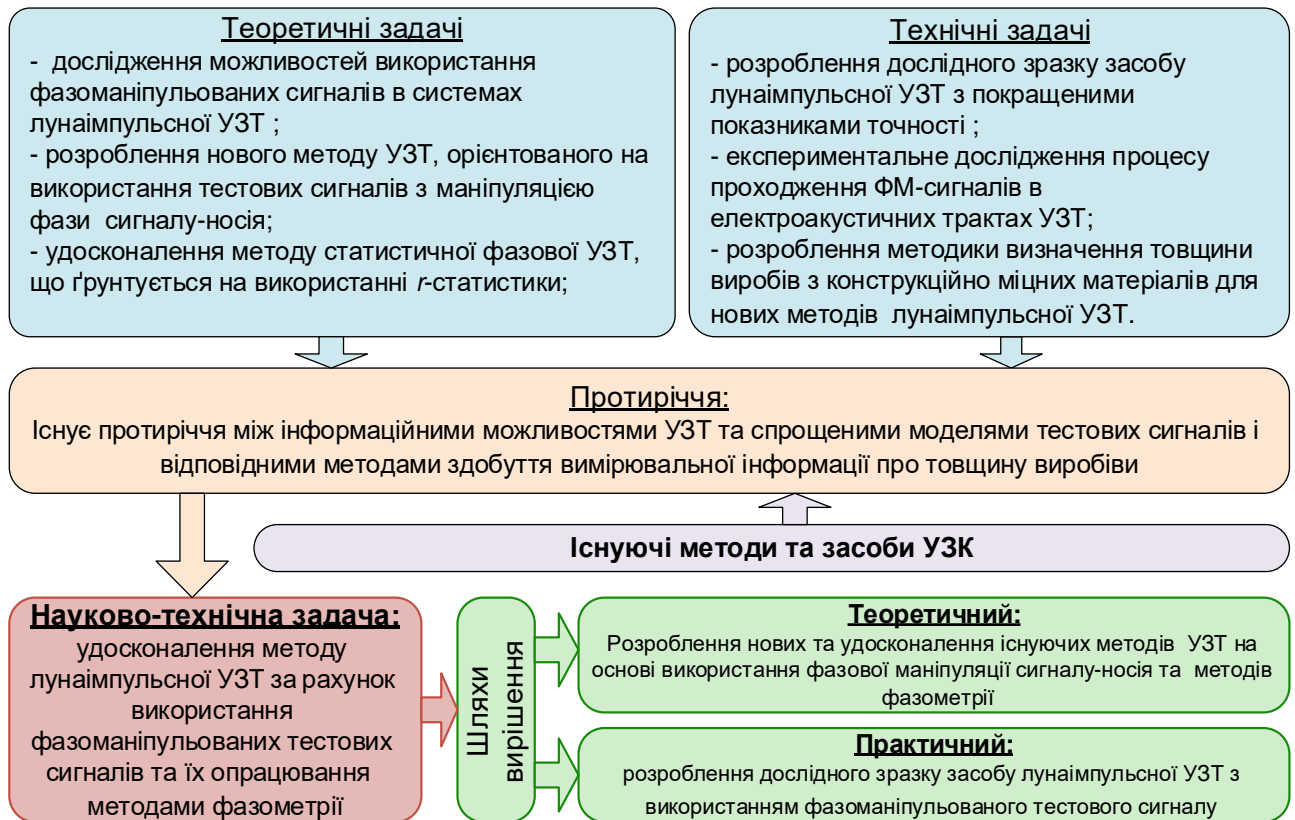


Рис.1.9. Графічне представлення формулювання науково-технічної задачі та шляхів її розв'язання.

Розв'язання поставленої науково-технічної задачі вимагає в теоретичному плані – розробку нових та удосконалення існуючих методів УЗТ на основі використання фазової маніпуляції сигналу носія та методів статистичної фазометрії, в практичному – розробку системи УЗТ з використанням фазоманіпульованого тестового сигналу та методів статистичної фазометрії.

Висновки до розділу

1. Завдання вимірювання товщини виробів є важливою складовою комплексного питання забезпечення надійної експлуатації машин і механізмів, конструкцій і споруд, технологічного обладнання у різних галузях промислово-господарчого комплексу України. Стоншення елементів конструкцій і механізмів внаслідок зношування та дії різних видів корозії було і лишається однією з найбільших загроз втрати ними несучої спроможності, погіршення

експлуатаційних характеристик та руйнування. Одним з ефективних методів вимірювання та контролю товщини виробів з конструкційно міцних елементів є ультразвуковий лунаїмпульсний метод.

2. В ультразвуковій лунаїмпульсній товщинометрії для прозвучування виробів використовують імпульсні сигнали з синусоїдним сигналом-носієм та наступним виділенням вимірюваного інтервалу часу, що відповідає затримці на поширення сигналу в матеріалі виробу, амплітудним методом за обвідними лунасигналів.

3. В реальних електроакустичних трактах товщиномірів обвідна лунасигналів зазнає значних змін та спотворень внаслідок значного розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів виробів та дії неконтрольованих шумів і завад. Це призводить до збільшення похибки формування часового інтервалу, суттєво обмежує точність вимірювання товщини і не може бути компенсовано збільшенням частоти дискретизації цифрового методу вимірювання часових інтервалів.

4. Перспективним напрямом розвитку ультразвукового лунаїмпульсного методу товщинометрії є застосування тестових сигналів більш складної структури, зокрема сигналів з фазовою маніпуляцією сигналу-носія.

5. Застосування в ультразвуковій лунаїмпульсній товщинометрії фазоманіпульованих сигналів вимагає проведення додаткових досліджень, пов'язаних з особливостями проходження таких сигналів в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів, їх впливу на фазові характеристики лунасигналів та формування за цією характеристикою вимірювальних часових інтервалів.

Виконаний аналіз дав змогу сформулювати мету та завдання роботи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ЛУНАІМПУЛЬСНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ-НОСІЇВ

В задачах вимірювального контролю товщини об'єктів та виробів, стінок балонів, які працюють під високим тиском, ємностей для зберігання агресивних рідин тощо використовується лунаїмпульсний метод ультразвукової товщинометрії [6, 14, 23, 36-39]. Зазвичай значення часової затримки τ оцінюють за положеннями в часі обвідних зондуючого і донного або двох донних ультразвукових сигналів, які отримуються за допомогою амплітудних виявлячів [23].

Певною вадою такого способу формування та вимірювання τ є наявність суттєвої похибки виділення часових інтервалів. Остання, в свою чергу, пов'язана з кінцевими тривалістю радіоімпульсного сигналу та швидкістю наростання/спаду його обвідної. В результаті дії різного роду неконтрольованих випадкових чинників похибка вимірювання часу затримки може сягати величини до одного періоду коливань.

Для зменшення похибки вимірювання τ у лунаїмпульсному методі скорочують тривалість та підвищують крутість фронту зондуючих радіоімпульсів, що потребує розширення смуги частот електроакустичного тракту та вимірювального каналу товщиномірів і, як наслідок, призводить до зниження їх чутливості та зменшення відношення сигнал/шум. В цьому розділі для подолання вказаного протиріччя запропоновано і досліджено використання в лунаїмпульсній УЗТ сигналів-носіїв з фазовою маніпуляцією.

2.1 Фазоманіпульовані сигнали та їх проходження через резонансні кола

Прагнення підвищення надійності та ефективності контролю стимулює процес удосконалення відомих і розроблення нових методів, засобів та методик

неруйнівного контролю. Цьому сприяє процес стрімкого розвитку та удосконалення цифрової та мікропроцесорної техніки, інформаційних технологій та технологій передавання інформації.

Один з напрямів удосконалення методів і засобів УЗНК пов'язаний з використанням зондуючих сигналів більш складної структури, оскільки прості сигнали не здатні задовольнити постійно зростаючі вимоги щодо точності вимірювань та вірогідності контролю.

Ефективність застосування складних сигналів теоретично доведена і практично підтверджена в різних галузях техніки – у радіолокації [60], зв'язку [68], системах передавання інформації [59]. В цілому, складні сигнали займають більшу смугу частот і мають ряд переваг порівняно з простими сигналами. Зокрема, завдяки широкій базі складний сигнал дозволяє покращити роздільну здатність в радіолокації, забезпечити сумісне вимірювання швидкості і дальності до цілі і т.п. Відомі приклади застосування сигналів зі складними законами модуляції і в НК. До цього напрямку досліджень належить і використання в УЗК фазоманіпульованих сигналів-носіїв. Під маніпуляцією розуміють процес управління стрибкоподібною зміною параметрів сигналу-носія. Зазвичай в якості останнього використовують просте гармонічне коливання. Наприклад, в роботах [62, 63, 69] розглянуто питання використання складних фазоманіпульованих сигналів (ФМ-сигналів) для підвищення відношення с/ш з метою прозвучування матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань. В цих роботах використовуються сигнали значної тривалості (до десяти періодів сигналу-носія і більше). Це призводить до розширення мертвої зони і, відповідно, збільшує нижню межу діапазону вимірюваних товщин ОК.

В даній роботі запропоновано використання короткотривалих (два – чотири періоду сигналу-носія) ФМ-сигналів для зменшення похибки виділення сигналів УЗТ. Оскільки п'єзоелектричні перетворювачі ультразвукових коливань уявляють резонансні системи [40-42, 70, 71], для кращого розуміння процесів формування сигналів УЗТ спочатку дослідимо особливості проходження ФМ-

сигналів через резонансні кола. В основу дослідження покладено результати, наведені в [72, 73].

Особливість ФМ-сигналів полягає у стрибкоподібній зміні фази високочастотного коливання на деяку фіксовану величину за незмінних значень амплітуди і частоти сигналу.

Використаємо одну з найпростіших різновидів фазової маніпуляції – двопозиційну чи двійкову маніпуляцію. В техніці цифрової передачі даних вона відома як маніпуляція типу BPSK (binary phase-shift keying). В цьому випадку сигнали утворюються послідовністю відрізків гармонічного сигналу однакової тривалості виду

$$\begin{aligned} s_0(t) &= S_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), t \in [0, T), \\ s_1(t) &= S_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \pi) = -s_0(t), t \in [T_c, 2T_c), \end{aligned} \quad (2.1)$$

де S_0 , f_0 , φ_0 – відповідно амплітуда, частота і початкова фаза сигналу,

T_c – тривалість відрізка гармонічного сигналу з незмінною початковою фазою,

$$T_c > \frac{1}{f_0}$$

З (2.1) видно, що цей вид маніпуляції можна реалізувати простим інвертуванням сигналу.

Спектральна щільність потужності сигналу BPSK [59] співпадає з щільністю амплітудно маніпульованого сигналу типу OOK (on-off keying) за умови виключення зі спектру частоти сигналу-носія:

$$S(f) = S_0^2 T_c \left\{ \frac{\sin(\pi|f_0 - f|T_c)}{\pi|f_0 - f|} \right\}^2. \quad (2.2)$$

На рис.2.1а представлено сигнал з двійковою фазовою маніпуляцією, для якого початок відліку часу обрано в момент виконання маніпуляції, а $S_0 = 1$ (що не має принципіального значення для розгляду цього питання).

Для спрощення аналізу проходження такого сигналу через одиночне резонансне коло вважатимемо, що, по-перше, резонансна частота кола співпадає з частотою сигналу, по-друге, значення T_c набагато більше тривалості перехідних

процесів в ланцюгах коливального контуру. Це дозволяє розглядати ізольовано реакцію ланцюга на кожний зі стрибків фази.

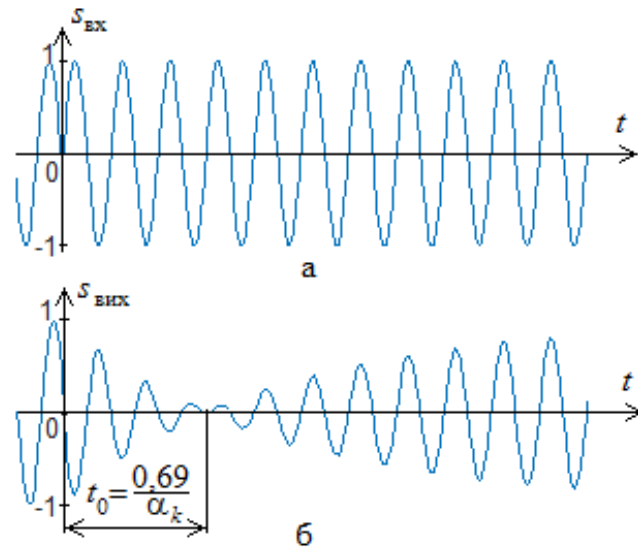


Рис.2.1. Графіки фазоманіпульованого колювання на вході (а) та виході (б) резонансного кола

Використовуючи принцип суперпозиції для $t > 0$ вихідний сигнал представимо сумою вільного колювання контуру, що існує після закінчення попереднього сигналу, і зростаючого колювання, обумовленого дією нового сигналу зі зміненою на величину π фазою. Ці два колювання представляються виразами

$$\begin{aligned} s_1(t) &= e^{-\alpha_k t} \cos(2\pi f_0 t), \\ s_2(t) &= -(1 - e^{-\alpha_k t}) \cos(2\pi f_0 t), \end{aligned} \quad (2.3)$$

де α_k – параметр контуру (обернено пропорційний добротності контуру).

Сумарний сигнал на виході резонансного кола дорівнює

$$s_{\text{вих}}(t) = s_1(t) + s_2(t) = -(1 - 2e^{-\alpha_k t}) \cos(2\pi f_0 t). \quad (2.4)$$

Цей сигнал представлено на рис.2.1,б. У виконаному досліді було обрано $\frac{\alpha_k}{f_0} = 0,23$. З (2.4) витікає, що внаслідок інерційності контуру стрибок фази вхідного сигналу приводить до зміни амплітуди вихідного сигналу. Обвідна сигналу $s_{\text{вих}}(t)$ набуває нульового значення в момент часу, що визначається з

рівняння: $1 - 2e^{-\alpha_k t} = 0$. З цього рівняння маємо $t_0 = \frac{0,69}{\alpha_k}$. Результатами моделювання підтверджено, що чим менше значення α_k (тобто чим більша добротність контуру), тим триваліший перехідний процес, і тим більше зміщення в часі t_0 моментів маніпуляції фази на вході і виході коливального контуру. Крім того слід відзначити, що моменти модуляції фази і маніпуляції обвідної сигналу співпадають в часі.

В коливальних контурах більш складної структури та у випадку, коли резонансна частота контуру та частота сигналу не співпадають, окрім паразитної модуляції обвідної сигналу порушується і характер зміни фази сигналу – стрибкоподібна зміна фази сигналу стає більш плавною. Для аналізу цього випадку достатньо в (2.3) врахувати розстроювання частот сигналу і власної частоти контуру.

З виконаного аналізу можна зробити висновок, що в УЗТ з використанням ФМ-сигналів доцільно використовувати широкосмугові п'єзoeлектричні перетворювачі [74], що необхідно для передавання стрибків фази сигналу-носія з якомога меншими спотвореннями. Також слід відзначити, що величина t_0 практично не впливає на точність визначення часу затримки сигналу в ОК у випадку, коли цей часовий інтервал визначається між стрибками фази сигналів-носіїв двох донних імпульсів. Це пояснюється тим, що в цьому разі затримка t_0 присутня у всіх відбитих сигналах.

2.2 Амплітудо-фазовий лунаїмпульсний метод ультразвукової товщинометрії з використанням сигналів-носіїв з фазовою маніпуляцією

Суть запропонованого методу УЗТ ґрунтується на можливості використання в ультразвуковій товщинометрії фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки на поширення сигналів в ОК за їх фазовою характеристикою. В основі опрацювання сигналів лунаїмпульсної УЗТ покладена методологія, що ґрунтується на використанні дискретного

перетворення Гільберта [75-77] та його особливостей для фазометрії [55, 58, 78]. Ідею способу викладено в [79] і розвинена в працях [80-86].

Постановка задачі.

Проводиться вимірювання товщини ОК за умови одностороннього доступу до нього лунаїмпульсним методом УЗТ із застосування суміщеного п'єзоелектричного перетворювача. Електроакустичний тракт (ЕАТ) лунаїмпульсного ультразвукового товщиноміра вважається широкосмуговим (відношення частоти сигналу-носія до смуги пропускання тракту задовольняє умову $\frac{f}{\Delta f} \leq 2$).

Для вимірювання затримки використовується ультразвукові коливання, яким відповідає фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал виду:

$$u_3(t) = \begin{cases} U(t)\sin 2\pi f t, & t \in [0, \tau_1], \\ -U(t)\sin 2\pi f t, & t \in [\tau_1, \tau_i], \\ 0, & t \notin [\tau_i, T_n], \end{cases} \quad (2.5)$$

де $U(t)$ – обвідна сигналу (або амплітудна характеристика сигналу, найчастіше має форму гаусового закону, чи лишається незмінною впродовж у часу існування $[0, \tau_1]$),

f – частота сигналу-носія,

τ_1 – момент маніпуляції фази,

τ_i – тривалість радіоімпульсу,

T_n – час спостереження сигналу.

Необхідно провести модельні дослідження поширення фазоманіпульованого сигналу в електроакустичному тракті УЗТ та процесу формування та визначення часу затримки сигналу за його амплітудною та фазовою характеристиками, а також оцінити точність запропонованого методу визначення часового інтервалу за стрибками значень фазової характеристики лунаісигналів.

Розв'язання поставленої задачі виконувалось поетапно.

Моделювання процесу опрацювання сигналів УЗТ та визначення τ .

Моделювання проводилось у середовищі Matlab [87, 88] за методикою, що ґрунтується на загальних засадах аналізу характеристик сигналів через їх дискретне перетворення Гільберта [55, 75, 76]. Моделювання виконувалось в наступній послідовності.

1. Формування зонduючого сигналу виду (2.5).
2. Формування відбитого сигналу (одного чи декількох) виду:

$$u_{\text{в}}(t) = \begin{cases} K_{\text{Т}} U \sin 2\pi f(t - \tau_3), & t \in [\tau_3, \tau_3 + \tau_1], \\ -K_{\text{Т}} U \sin 2\pi f(t - \tau_3), & t \in [\tau_3 + \tau_1, \tau_3 + \tau_i], \\ 0, & t \notin [\tau_3 + \tau_i, T_n], \end{cases} \quad (2.6)$$

де $K_{\text{Т}}$ – коефіцієнт ЕАТ,

τ_3 – час затримки на поширення сигналу в ОК.

3. Визначення аналізованого сигналу як адитивної суміші зонduючого і донного (одного чи декількох) сигналів виду

$$u(t) = u_3(t) + u_{\text{в}}(t) \quad (2.7)$$

та його гільберт-образу

$$\hat{u}(t) = \mathbf{H}[u(t)]. \quad (2.8)$$

де \mathbf{H} – оператор перетворення Гільберта сигналу $u(t)$,

$\hat{u}(t)$ – позначення гільберт-образу сигналу $u(t)$.

4. Визначення розгорнутої фазової характеристики сигналу (ФХС) $u(t)$

$$\tilde{\Phi}(t) = \arctg \frac{\hat{u}(t)}{u(t)} + \mathbf{K} [u(t), \hat{u}(t)] \quad (2.9)$$

де \mathbf{K} – оператор розгортання фазової характеристики сигналу (ФХС) за межі інтервалу $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ (тобто за межі однозначності функції $\arctg(x)$). Дія цього оператора зводиться до додавання константи π до вирахованих за функцією $\arctg(x)$ поточних значень фази сигналу щоразу, коли значення фази змінюються від $0,5\pi$ до $-0,5\pi$.

5. Визначення моментів стрибкоподібної зміни значень ФХС виду (2.9) на величину $\pm\pi$ за її похідною в часі $\frac{\partial\tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$. Ця похідна може мати як інформативні стрибки значень, викликані фазовою модуляцією сигналу, так і неінформативні стрибки, спричинені дією шумів на процес розгортання ФХС. Неінформативні стрибки значень ФХС зосереджені в основному на ділянках, де відсутні зондуючий або донні сигнали і присутня тільки шумова складова, яка може бути викликана як фізичними шумами в ЕАТ та електронному тракті, так і обчислювальними ефектами.

6. Селекція інформативних стрибків значень ФХС за обвідною сигналу $u_b(t)$ (2.7).

6.1. Визначення обвідної сигналу $u(t)$

$$A(t) = \sqrt{u^2(t) + \hat{u}^2(t)}. \quad (2.10)$$

6.2. Формування стробів з функції $A(t)$ після її медіанної фільтрації з вікном апертурою M_a

$$str(t, M_a) = 0,5[sign(\mathbf{Med}(A(t), M_a)) + 1], \quad (2.11)$$

де **Med** – оператор медіанної фільтрації,

$sign$ – знакова функція.

Медіанна фільтрація використана для пригнічення шумів і імпульсних завад у обвідній (2.10) за одночасного збереження здатності передавати стрибки функції.

6.3. Відокремлення інформативних стрибків ФХС шляхом стробування похідної $\frac{\partial\tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$, тобто отримання добутку функцій

$$str(t, M_a) \cdot \frac{\partial\tilde{\Phi}(t)}{\partial t}. \quad (2.12)$$

Ця процедура дозволяє блокувати стрибки значень ФХС, які не пов'язані з фазовою маніпуляцією сигналу-носія і можуть бути викликані дією шуму в ЕАТ товщиноміра або обчислювальними ефектами.

7. Оцінювання часу затримки сигналу на поширення в ОК за інформативними стрибками ФХС як інтервал часу між двома стрибками значень ФХС, визначеними для двох суміжних донних сигналів (або для зондуєчого і донного сигналів).

Програма, що реалізує розглянуту методику формування та опрацювання сигналів УЗТ за запропонованим методом, наведена у Додатку Г.

В проведеному модельному експерименті формувався радіоімпульсний фазоманіпульований сигнал тривалістю 4 періоди сигналу-носія з наступними параметрами:

$$U = 5 \text{ В}; f = 5 \text{ МГц}; \tau_1 = 2T; \tau_i = 4T; K_T = \frac{1}{7}; \tau_3 = 12T,$$

$$T = \frac{1}{f} - \text{період сигналу-носія}, T_d = \frac{1}{f_d} - \text{період дискретизації сигналу}.$$

Змодельований сигнал $u(t)$, як сума зондуєчого і донного сигналів зображено на рис. 2.2а, а результати розрахунку розгорнутої ФХС за виразом (2.4) – на рис. 2.2б (на рис.2.2а не враховано інвертування фази сигналу-носія після відбиття від межі ОК – повітря, оскільки це не має принципового значення для запропонованого способу виділення і вимірювання часового інтервалу).

Моменти часу, що відповідають виконанню фазової маніпуляції сигналу-носія визначаються за положенням у часі максимумів похідної $\frac{\partial \tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$ (рис.2.2 в). З цього графіку видно, що отримана функція має інформативні та неінформативні стрибки значень ФХС. Останні можуть виникнути, наприклад, внаслідок дії адитивних шумів, що супроводжують процес формування і перетворення сигналів УЗТ.

Обчислена за формулою (2.9) обвідна сигналу $u(t)$ показана на рис. 2.2 г. Обвідна також містить стрибок значень в момент фазової маніпуляції сигналу. Ця ознака може бути додатково використана для формування вимірюваного часового інтервалу, але вона виявилась менш стійкою до дії шумів. Результати стробування похідної $\frac{\partial \tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$ за обвідною аналізованого сигналу $A(t)$ (тобто з вилученими неінформативними стрибками значень ФХС) наведено на рис. 2.2 д.

Тривалість τ_3 затримки на поширення сигналу УЗТ в ОК визначається як інтервал часу між інформативними стрибками ФХС (див. рис.2.2 д).

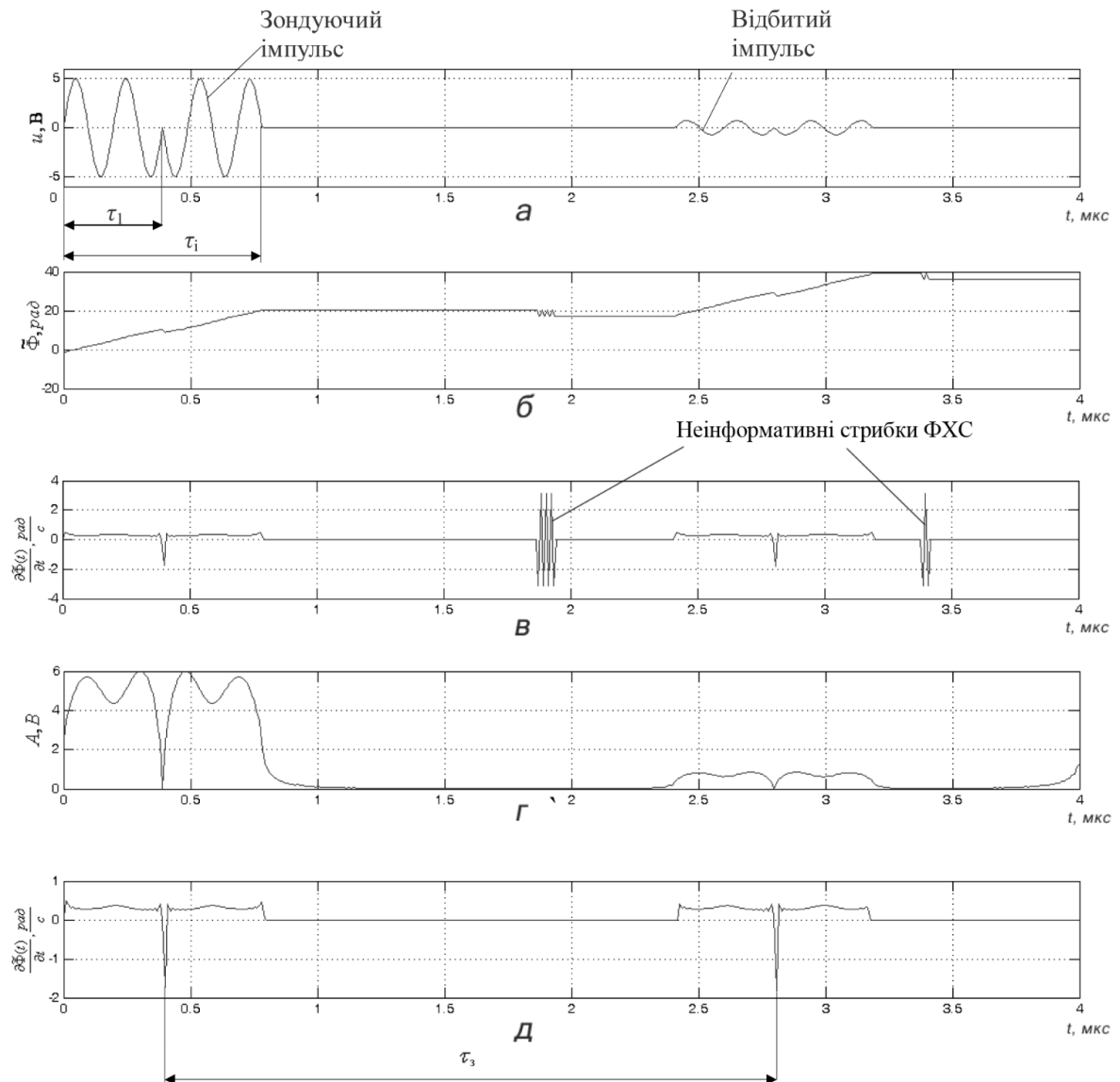


Рис. 2.2. Графіки модельного сигналу (а) та його характеристик (б – д), що ілюструють процес визначення часового інтервалу τ_3

З наведених графіків видно, що в околі інтервалів часу $t \in (0,4; 0,405)$ мкс та $t \in (2,805; 2,81)$ мкс фаза сигналу стрибкоподібно змінюється. Стрибки значень фази надійно виявляються, а їх положення в часі локалізовані і лишаються стабільними в широкому діапазоні зміни амплітуди донних сигналів. Це витікає з того що, по-перше, амплітудні значення імпульсів, які відповідають початку і кінцю вимірюваного часового інтервалу (рис. 2.2. д) в певних межах не залежать

від амплітуди сигналу (на відміну від імпульсів, що виникають під час визначення обвідної сигналу за виразом (2.10), див. рис. 2.2 г) і, по-друге, фронти цих стрибків значень ФХС мають значну крутість, а тривалість відповідних імпульсів функції $\frac{\partial \tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$ значно менша за T_d . Останнє дає змогу знехтувати похибкою від кінцевої тривалості цих імпульсів.

Таким чином, виділений в такий спосіб інтервал часу, обмежений моментами стрибкоподібної зміни фази сигналу, з високою точністю відповідає заданому в модельному експерименті інтервалу часу. Далі буде показано, що ця властивість зберігається і у разі проведення експериментів з реальними сигналами УЗТ і визначенні часу поширення ультразвукових коливань в ОК.

Окремо слід зазначити, що у випадку цифрового опрацювання сигналів УЗТ вимірювання часового інтервалу за цим методом здійснюється автоматично. Внаслідок виконання аналого-цифрового перетворення сигналів отримують цифровий образ $u[j]$ сигналу $u(t)$ на еквідистантній часовій ґратці

$$S[j] = S[jT_d], \quad (2.13)$$

$$\text{де } j = \overline{1, J}, J = \left[\frac{T_n}{T_d} \right]^+,$$

$[\cdot]^+$ – позначення операції виділення цілої частини числа.

Відповідно і всі характеристики сигналу є функціями дискретного аргументу jT_d – такий перехід до дискретного часу в формулах (2.6) – (2.12) вимагає лише заміни неперервного аргументу t на дискретний час jT_d . В цьому разі вимірюваний часовий інтервал τ_z набуває дискретних значень, а визначення його величини зводиться до отримання номерів екстремальних відліків у масиві значень

$$str[j, M_a] \cdot \Delta \tilde{\Phi}[j], j = \overline{1, J}. \quad (2.14)$$

У формулі (2.14) $\Delta \tilde{\Phi}[j]$ – це кінцеві різниці суміжних елементів масиву $\tilde{\Phi}[j]$.

Нехай номери цих відліків набувають значень $j_{\text{п}}, j_{\text{к}}$, що відповідає початку і закінченню часового інтервалу. Тоді визначене з кроком $T_{\text{д}}$ значення часового інтервалу дорівнює

$$\tau_3 = T_{\text{д}}(j_{\text{к}} - j_{\text{п}}) = T_{\text{д}}k. \quad (2.15)$$

В комп'ютерному експерименті із застосуванням модельних сигналів часова затримка також задається з кроком $T_{\text{д}}$. Згідно викладеного вище та з огляду на синхронність процесів формування сигналів, завдання та обчислення τ_3 , ця затримка визначається без похибки.

У випадку проведення фізичних експериментів з реальними сигналами, навіть за цифрового синтезу зонduючого сигналу, внаслідок неконтрольованих затримок досліджуваних сигналів положення в часі моментів фазової маніпуляції сигналу-носія і стрибки фази його цифрового прототипу не співпадають. І це неспівпадіння має випадковий характер, внаслідок чого виникає похибка квантування часового інтервалу на початку і в кінці інтервалу. Ця похибка – похибка квантування, притаманна різним методам цифрового вимірювання часових інтервалів [89]. З урахуванням цього визначений в умовах реального вимірювального експерименту часовий інтервал можна представити моделлю

$$\tau = T_{\text{д}}(j_{\text{к}} - j_{\text{п}}) + \Delta\tau, \quad (2.16)$$

де $\Delta\tau$ – похибка квантування часового інтервалу.

Похибка $\Delta\tau$ має випадковий характер, її ймовірність розподілена за законом Сімпсона. Діапазон можливих значень цієї похибки обмежений інтервалом $\Delta\tau \in (-T_{\text{д}}, T_{\text{д}})$. Середнє квадратичне значення похибки квантування часового інтервалу дорівнює [89]

$$\sigma_{\Delta\tau} = \frac{T_{\text{д}}}{\sqrt{6}} \quad (2.17)$$

Товщина виробу, за відомої швидкості ультразвуку, визначається згідно з виразом (1.2).

Проведені комп'ютерні вимірювальні експерименти засвідчили, що цей метод можна рекомендувати для УЗТ за відношення $c/\text{ш} > 10$. У випадку зменшення цього відношення спостерігаються значні помилки у виявленні стрибків значень ФХС, визначенні їх часового положення і, як наслідок – появі значних помилок вимірювання часових інтервалів.

2.3 Розроблення двошкального лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв

Представлений в п.2.2 фазовий спосіб вимірювання часової затримки сигналів УЗТ має певний недолік, який обмежує його використання на практиці. Цей недолік полягає в тому, що наявність шумів, які супроводжують поширення і перетворення сигналів в електроакустичному тракті товщиноміра, приводить до спотворення їх фазових характеристик і, як наслідок, до зміщення в часі інформаційних стрибків цієї характеристики, і далі – до появи похибки виділення та вимірювання часових інтервалів. Наприклад, шуми і завади можуть виникати в п'єзоелектричному перетворювачі, в акустичному тракті товщиноміра (перевідбиття і розсіювання сигналу на неоднорідностях структури матеріалу і дефектах форми), в каскадах підсилювання сигналу УЗТ тощо. Крім того, на початку і в кінці вимірюваного інтервалу, у випадку його цифрового вимірювання, виникає похибка квантування, яка також зменшує точність вимірювання останніх. Ці похибки стають суттєво відчутними у випадку зменшення частоти дискретизації.

В той же час лишається не використаним весь інформаційний ресурс сигналу УЗТ, зокрема той, що міститься у початковій фазі сигналу-носія. Дійсно, на сьогодні за відношення $c/\text{ш} > 10$, прийнятних апаратурних витрат і часу вимірювання можна визначити фазу сигналу з похибкою $1^\circ - 2^\circ$. Отримання відповідної похибки вимірювання часових інтервалів за наведеним в п.2.2 способом потребує використання частоти дискретизації

порядку $f_d = (180 \dots 360)f$, що призводить до невиправданої апаратурної надлишковості.

Використати вказаний інформаційний ресурс сигналу УЗТ можна і в інший спосіб – на основі застосування технології багатоскальних фазових вимірювань. Це дозволяє підвищити точність вимірювання часових інтервалів до точності вимірювання фазових зсувів сигналу-носія без збільшення частоти дискретизації сигналу.

2.3.1 Метод багатоскальних багаточастотних фазових вимірювань

Метод багатоскальних фазових вимірювань використовують для прецизійного вимірювання відстаней, електричної довжини кабелів, напрямку у просторі (пеленгу) [90 -94] та ін. У цих прикладних застосуваннях виконується вимірювання фазових зсувів гармонічних сигналів, які пройшли певний чотириполюсник (або фізичне середовище, яке має певні характеристики і розміри та обумовлює затримку і загасання сигналу) на декількох частотах (інколи на одній як, наприклад, це має місце у фазових пеленгаторах [93, 94]) з наступним узгодженням отриманих результатів з метою усунення багатозначності фазових вимірювань на найвищій частоті.

Операція узгодження результатів вимірювань фазових зсувів сигналів, спрямована на усунення багатозначності фазових вимірювань, є специфічною для такого роду вимірювань і потребує більш детального аналізу з метою адаптації до поставленого завдання.

В роботі [92] розглянуто багатоскальний спосіб вимірювання фазового часу затримки τ гармонічних сигналів частотою f_B , де $\tau \gg \frac{1}{f_B}$. Повний фазовий зсув сигналів на цій частоті становить

$$\Phi_B = 2\pi f_B \tau = 2\pi n + \varphi_B, \quad (2.18)$$

де n – ціле число, що дорівнює кількості цілих фазових циклів сигналу, а фазовий зсув $\varphi_B \in [0, 2\pi]$.

Завдання усунення багатозначності полягає у однозначному визначенні числа n . Сутність способу за [92] полягає в тому, що за допомогою допоміжного вимірювання фазового зсуву сигналів φ_n на низькій частоті $f_n < f_b$ тестового сигналу (на грубій шкалі), визначають число цілих фазових циклів n , яке міститься у повному фазовому зсуві сигналів високої частоти f_b , який відповідає часу затримки сигналу τ_n . Значення f_n вибирається з умови однозначності результату вимірювання фазових зсувів на цій частоті, тобто з умови $\varphi_n = 2\pi f_n \tau < 2\pi$. Вважається, що середовище передавання сигналу є недисперсійним.

Результат вимірювання затримки сигналу на високій частоті представляється виразом:

$$\tau_\Phi = f_b^{-1} \left(n + \frac{\varphi_b}{2\pi} \right), \quad (2.19)$$

За виразом (2.19) похибка вимірювання затримки τ_Φ визначається похибкою визначення фазових зсувів $\Delta\varphi_b$ на високій частоті. Це забезпечує зменшення відносної похибки вимірювання затримки порядку $\frac{2\pi\Delta\varphi_b}{2\pi n + \varphi_b}$.

Число n узгоджене зі значенням $\varphi_b \in [0, 2\pi]$ обчислюється за виразом:

$$n = \left[\frac{\varphi_n f_b}{2\pi f_n} - \frac{\varphi_b}{2\pi} + 0,5 \right]^+. \quad (2.20)$$

Визначене за алгоритмом (2.20) числа n є найбільш достовірним і в певних межах незалежним від значення фазових зсувів сигналів [92].

Умова відсутності грубих помилок (під грубими помилками вимірювання розуміється помилка визначення числа n) задається умовою

$$\left[\frac{\Delta\varphi_n f_b}{2\pi f_n} - \frac{\Delta\varphi_b}{2\pi} + 0,5 \right]^+ = 0, \quad (2.21)$$

де $\Delta\varphi_n$ – похибка визначення фазових зсувів на низькій частоті.

У разі декількох ступенів перерахунку результатів вимірювання з однієї шкали на другу умова (2.21) повинна виконуватись для всіх пар частот сигналів,

що беруть участь у послідовних перерахунках і визначенні числа n за алгоритмом (2.20).

Цей спосіб має обмеження для використання в ультразвуковій товщинометрії, оскільки потребує виконання фазових вимірювань в широкому діапазоні частот. Чим більше товщина вимірюваного ОК, тим більшим є число n , і тим нижчою повинна бути частота f_n для збереження умови однозначного вимірювання φ_n . З іншого боку, прагнення підвищення точності вимірювання вимагає підвищення частоти f_b . Разом це призводить до необхідності розширення частотного діапазону сигналів, в той час як ультразвукові перетворювачі працюють в обмеженому частотному діапазоні і забезпечити виконання умови $f_b \gg f_n$ не видається можливим.

В той же час існує інший варіант підвищення точності визначення затримки за рахунок вимірювання і врахування значення усередненого фазового зсуву сигналів-носіїв УЗТ.

Подібна ідея запропонована в [95] і розвинута в роботах [96, 97] для зменшення похибки квантування часових інтервалів і удосконалення методу УЗТ з використанням ФМ-сигналів, що викладений в п.2.2. Отже метою подальших досліджень було визначено удосконалення представленого в п.2.2 методу за рахунок додаткового вимірювання долі часової затримки сигналів УЗТ в межах значення T_d через фазові зсуви сигналу-носія після його поширення в електроакустичних трактах ультразвукових товщиномірів.

2.3.2 Сутність двошкального методу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв

Суть удосконалення методу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв полягає у здійсненні прецизійного вимірювання τ через фазову характеристику гармонічного сигналу з частотою f сигналу-носія. Такий підхід, який формально описує формула (2.19), передбачає отримання результату наступним чином:

- за стрибками ФХС вимірюється затримка $\tau_z = T_d k$ (2.15);

- за значенням τ_3 обчислюється кількість відповідних фазових циклів сигналу частотою f як складова результату, що отримана за «грубою» шкалою (тобто за шкалою визначення повної фази з кроком 2π)

$$n + \Delta n = \left[\frac{\tau_3}{T} \right] = \left[\frac{kT_d}{T} \right], \quad (2.22)$$

де Δn – дробова частина кількості фазових циклів, яка використовується для узгодження результатів;

- за «точною» шкалою здійснюється прецизійне вимірювання фазових зсувів сигналу-носія з дискретом значно меншим за $2\pi fT_d$, тобто частки τ_3 в межах напівперіоду сигналу-носія на початку і в кінці вимірювального інтервалу;
- виконується узгодження отриманих результатів і обчислення оцінки затримки сигналу УЗТ \hat{t} за загальним виразом (2.19).

Сутність такого методу пояснює рис. 2.3.

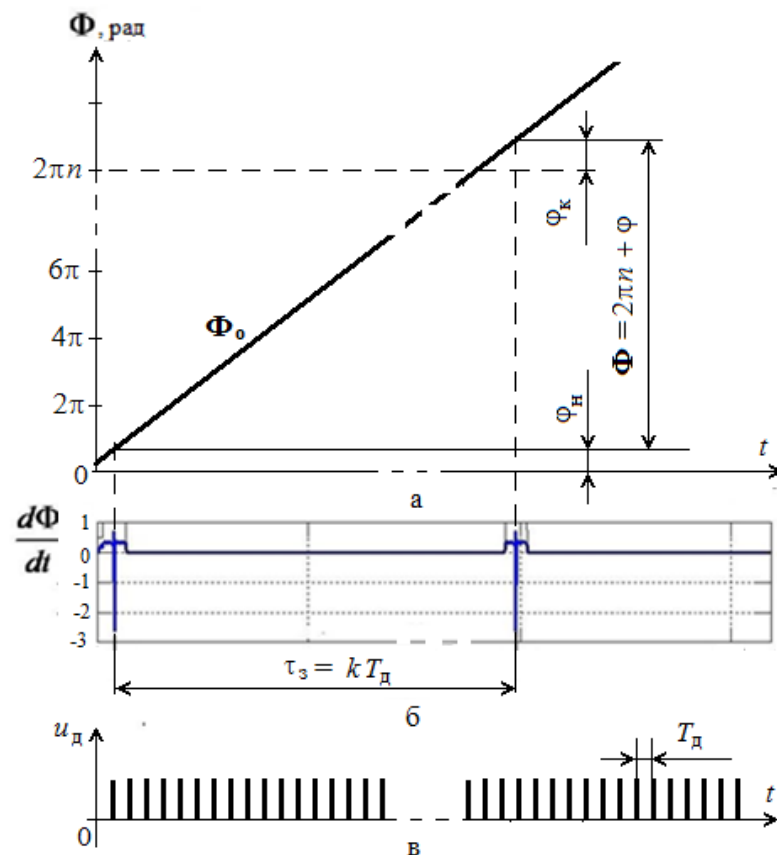


Рис. 2.3. Графічна ілюстрація двошкального методу лунаїмпульсної УЗТ з використанням фазоманіпульованого сигналу-носія

На рис. 2.3 зображено: епюра а – графік фази опорного гармонічного коливання $\Phi_0 = 2\pi ft$, яке використовується для підвищення точності вимірювання затримки; епюра б – графік стрибків фазової характеристики фазоманіпульованих сигналів УЗТ; епюра в – послідовність імпульсів дискретизації часових інтервалів з періодом T_d .

Зазвичай в цифрових системах УЗТ використовують відношення $\frac{T}{T_d} \in (10...20)$. Це означає, що, по-перше, значенню T_d відповідає значний дискрет фазового зсуву сигналу-носія – $2\pi f T_d \in \pi(0,1 \dots 0,2)$, по-друге, отримувані на одному періоді сигналу-носія ці $(10...20)$ відліків сигналу можуть бути використані для визначення фазового зсуву $\varphi = \overline{\varphi_k} - \overline{\varphi_n}$ за усередненими значеннями фазового зсуву сигналів наприкінці і на початку вимірювального інтервал відповідно $\overline{\varphi_k}, \overline{\varphi_n}$.

Фазові зсуви $\overline{\varphi_k}, \overline{\varphi_n}$ можуть бути отримані відносно фази опорного коливання, когерентного з фазою сигналу-носія. Якщо, наприклад, різниця фазових характеристик сигналу-носія $\tilde{\Phi}$ та Φ_0 в околі області фазової маніпуляції на початку часового інтервалу визначається множиною різниць фазових зсувів

$$\varphi = (\varphi_j = \Phi[j] - \Phi_0[j], j = \overline{1, g}), \quad (2.23)$$

то середнє значення кута згідно з [55, 99] обчислюється як вибіркового середній фазовий зсув сигналів

$$\varphi_c = L[S, C] = \arctg \frac{S}{C} + \frac{\pi}{2} \{2 - (\text{sign}S)(1 + \text{sign}C)\}. \quad (2.24)$$

де L – оператор визначення фазового зсуву сигналів в інтервалі

S, C – відповідно синус і косинус моменти, що визначаються за вибіркою φ

$$C = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^g \cos \varphi_j, \quad S = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^g \sin \varphi_j. \quad (2.25)$$

Узгодження отриманих на грубій і точній шкалі результатів здійснюється на тій основі, що молодші розряди числа n співпадають за вагою зі старшими розрядами числа φ , що ілюструє рис. 2.4.

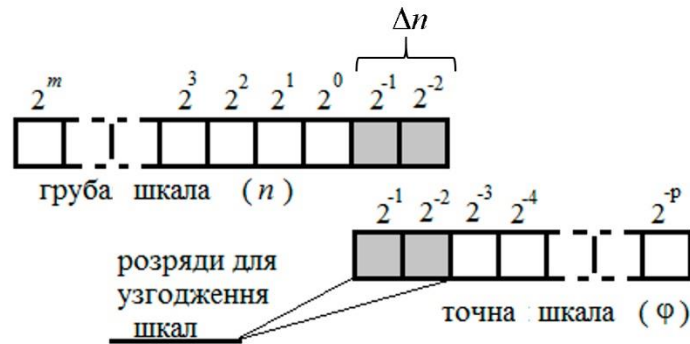


Рис. 2.4. Графічна ілюстрація процесу узгодження отриманих на грубій і точній шкалі результатів

Структурно-логічну схему двошкального лунаїмпульсного методу УЗТ з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв показано на рис. 2.5.

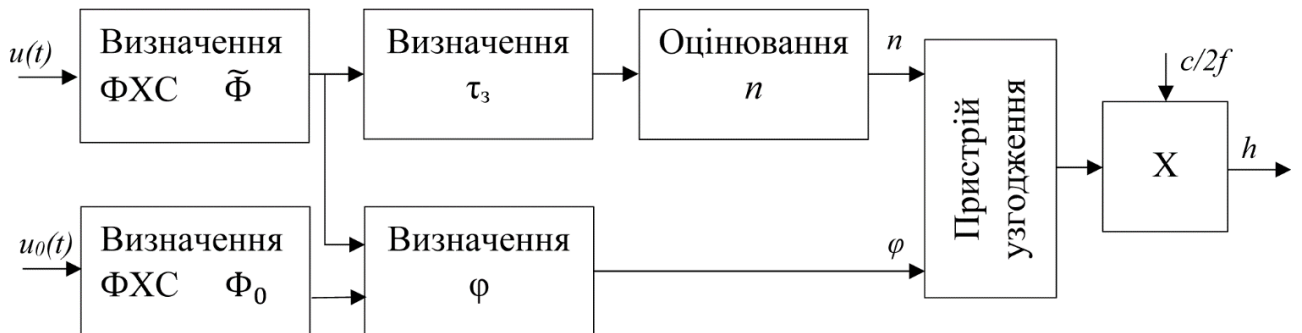


Рис. 2.5. Структурно-логічна схема двошкального лунаїмпульсного методу УЗТ з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв

Особливістю запропонованого методу УЗТ є те, що він передбачає визначення τ і фазових зсувів сигналів $\Delta\varphi$ на одній методологічній основі – через фазову характеристику сигналів УЗТ з фазовою маніпуляцією.

Грубе значення затримки сигналу, як і у викладеному в п.2.2 способі, визначається за інформаційними стрибками значень фазової характеристики

фазоманіпульованого сигналу-носія і обтяжене похибкою, спричиненою дією шуму, який супроводжує процес випромінення, поширення в ОК і приймання ультразвукового сигналу, його перетворення в електричний сигнал та підсилення.

За двошкальним методом вимірювання часова затримка τ_3 , аналогічно (2.19), визначається як фазовий час поширення сигналу в ОК за загальною формулою

$$\tau_3 = \left(n + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \frac{1}{f}, \quad (2.23)$$

де $\varphi = \overline{\varphi}_k - \overline{\varphi}_n$ – різниця середніх фазових зсувів сигналу-носія, отримана за суміжними луна сигналами в кінці і на початку вимірюваного часового інтервалу.

Значення часу затримки в періодах сигналу-носія n/f визначається на основі вимірювання часового інтервалу між стрибками фазової характеристики сигналу-носія. Уточнююче значення затримки визначається на основі вимірювання фазового зсуву сигналів φ в кінці та на початку цього інтервалу, яке здійснюється відносно фази гармонічного сигналу:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}. \quad (2.24)$$

Узгодження грубого і уточнюючого значень (уточнення цілої кількості фазових циклів) відбувається за формулою:

$$\hat{n} = \left[f\tau_3 - \frac{\varphi}{2\pi} + 0,5 \right]^+. \quad (2.25)$$

З урахуванням відомої швидкості c_l поширення ультразвуку в ОК, товщина ОК визначається за формулою:

$$h = \frac{c_l}{2f} \left(\hat{n} + \frac{\varphi}{2\pi} \right) = \frac{c_l}{2f} \left(\left[f\tau_3 - \frac{\varphi}{2\pi} + 0,5 \right]^+ + \frac{\varphi}{2\pi} \right). \quad (2.26)$$

Вираз (2.26) є рівнянням вимірювання запропонованого двошкального методу УЗТ.

2.3.3 Моделювання процесу вимірювання товщини виробів за двошкальним методом ультразвукової товщинометрії з фазоманіпульованими сигналами

Постановка задачі. Вимірюється товщина h виробу ультразвуковим лунаїмпульсним методом. Швидкість c_l поширення поздовжніх ультразвукових хвиль в матеріалі виробу вважається відомою. Доступним дослідженню є фазоманіпульований сигнал з гармонічним сигналом-носієм відомої частоти f , який поширюється в електроакустичному тракті товщиноміра та гармонічний сигнал частотою f і довільною початковою фазою (або його фазова характеристика Φ_0). Необхідно запропонувати і проаналізувати двошкальний фазовий метод ультразвукового прецизійного вимірювання товщини виробу h , що ґрунтується на додатковому вимірюванні фазових зсувів фазоманіпульованого сигналу-носія донних імпульсів.

Розв'язання поставленої задачі. Ідея способу вимірювання h полягає у наступному. Для визначення часової затримки τ формується фазоманіпульований акустичний зонduючий сигнал виду (2.5). Для прийнятих сигналів $u(t) = u_z(t) + u_v(t)$ визначається фазова характеристики $\Phi(t)$ і за положенням в часі стрибків значень цієї характеристики визначається часова затримка τ з точністю до T_d [95-97].

Для уточнення значення часового інтервалу виконується вимірювання фазового зсуву сигналу-носія відносно когерентного з ним опорного сигналу виду $u_0(t) = U_0 \sin 2\pi ft$ (без маніпуляції) на початку і в кінці вимірюваних часових інтервалів, а уточнене значення часової затримки $\hat{\tau}$ отримується розрахунковим шляхом.

Структура програмно-апаратної реалізації ультразвукового двошкального способу вимірювання товщини виробів наведена на рис.2.6, на якому позначено: ПГ –перетворення Гільберта, ДФХС – визначення дискретної фазової характеристики сигналу, МФ – медіанна фільтрація, Р – процедура розгортання ФХС, Σ – підсумовування значень ФХС, d/dt – операція диференціювання,

ГВЧІ – грубе вимірювання часового інтервалу, ВФЗС – вимірювання фазових зсувів сигналів, ПУ – процедура узгодження грубого і точного відліків.

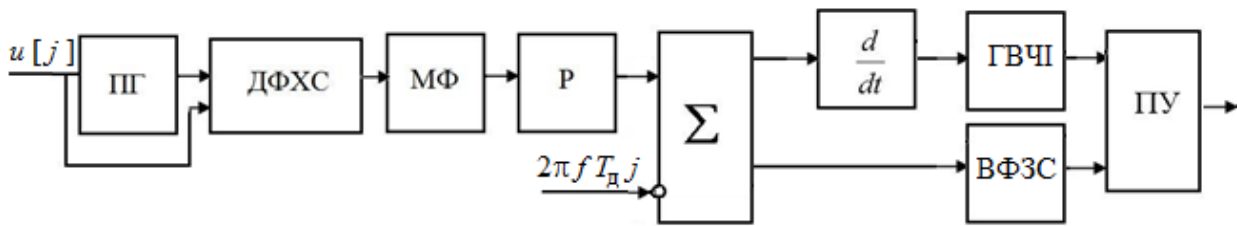


Рис. 2.6. Структура програмно-апаратної реалізації процесу опрацювання сигналів і отримання результату вимірювання затримки за ультразвуковим двошкальним способом вимірювання товщини виробів

Програмна реалізація процесу опрацювання сигналів за двошкальним методом лунаїмпульсної УЗТ з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв наведена у Додатку Г.

Отримання і опрацювання сигналів УЗТ здійснюється наступним чином. Передбачається, що введення в ОК і отримання ультразвукового сигналу відбувається за допомогою суміщеного п'єзоелектричного перетворювача, після чого сигнал підсилюється і оцифровується в аналого-цифровому перетворювачі. В результаті такого попереднього опрацювання сигналу отримують його дискретний образ $u[j]$.

Після визначення в блоці ПГ (рис.2.6) гільберт-образу сигналу $\hat{u}[j]$ в блоці ДФХС отримують оцінку дробової частини ФХС, тобто частини ФХС в межах інтервалу $[0, 2\pi)$. Остання може бути спотворена неінформативними стрибками, які викликані дією шуму і мають властивості імпульсної завади. З метою фільтрації дробової частини ФХС (заглушення шумової складової одночасно зі збереженням стрибків ФХС) в структуру на рис.2.6 включений круговий медіанний фільтр (МФ) [98]. Розгорнуту ФХС отримують в блоці розгортання Р. В суматорі Σ з отриманої ФХС вилючається лінійний тренд, тобто визначається різниця $\Delta\Phi = \Phi[j] - 2\pi f T_d j$. В блоці $\frac{d}{dt}$ відбувається диференціювання різниці

$\Delta\varphi$. Селекція інформативних стрибків ФХС, за якими визначається τ_3 , може бути виконана за обвідною сигналу, обчисленою за виразом (2.10) (в структурі на рис.2.6 блок селекції відсутній). У вимірювачі часових інтервалів (ВЧІ) відбувається визначення τ_3 за виділеними інформативними стрибками ФХС. Усереднене значення фазових зсувів $\Delta\varphi$ сигналу-носія отримують у відповідному блоці $\Delta\varphi$. Отримані значення τ_3 та $\Delta\varphi$ поступають на пристрій узгодження (ПУ), який визначає суму $\left(n + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right)$. Після цього значення товщини h , за відомої швидкості ультразвуку, обраховується за формулою (1.2).

Підтвердження працездатності запропонованого способу проведено шляхом комп'ютерного вимірювального експерименту.

Моделювання виконувалось у два етапи:

1. моделювання одношкального методу визначення часової затримки; на цьому етапі отримувалось грубе значення часової затримки за викладеним в п.2.2. методом;
2. моделювання процесу вимірювання фазового зсуву сигналів за двошкальним методом; на цьому етапі за допомогою розрахунків обчислювалось уточнене значення часової затримки і виконувався співставний аналіз отриманих результатів.

У проведеному модельному експерименті формувався радіоімпульсний сигнал з фазоманіпульованим на величину π сигналом-носієм, гаусовою обвідною і такими параметрами:

$$U = 10 \text{ (у відносних одиницях)}, f = 5\text{МГц}, \\ \tau_1 \approx 3T, \tau_i \approx 6T, K_T = 0,6, \tau_3 = 70T.$$

Результати моделювання представлені на рис. 2.7.

На рис 2.7. відображено:

- епюра а – графік сигналу УЗТ (зондуючий і перший відбитий сигнал);
- епюра б – графіки розгорнутої фазової характеристики сигналу УЗТ та фази гармонічного сигналу з частотою сигналу-носія та позначеними ділянками для вимірювання фазових зсувів сигналів;

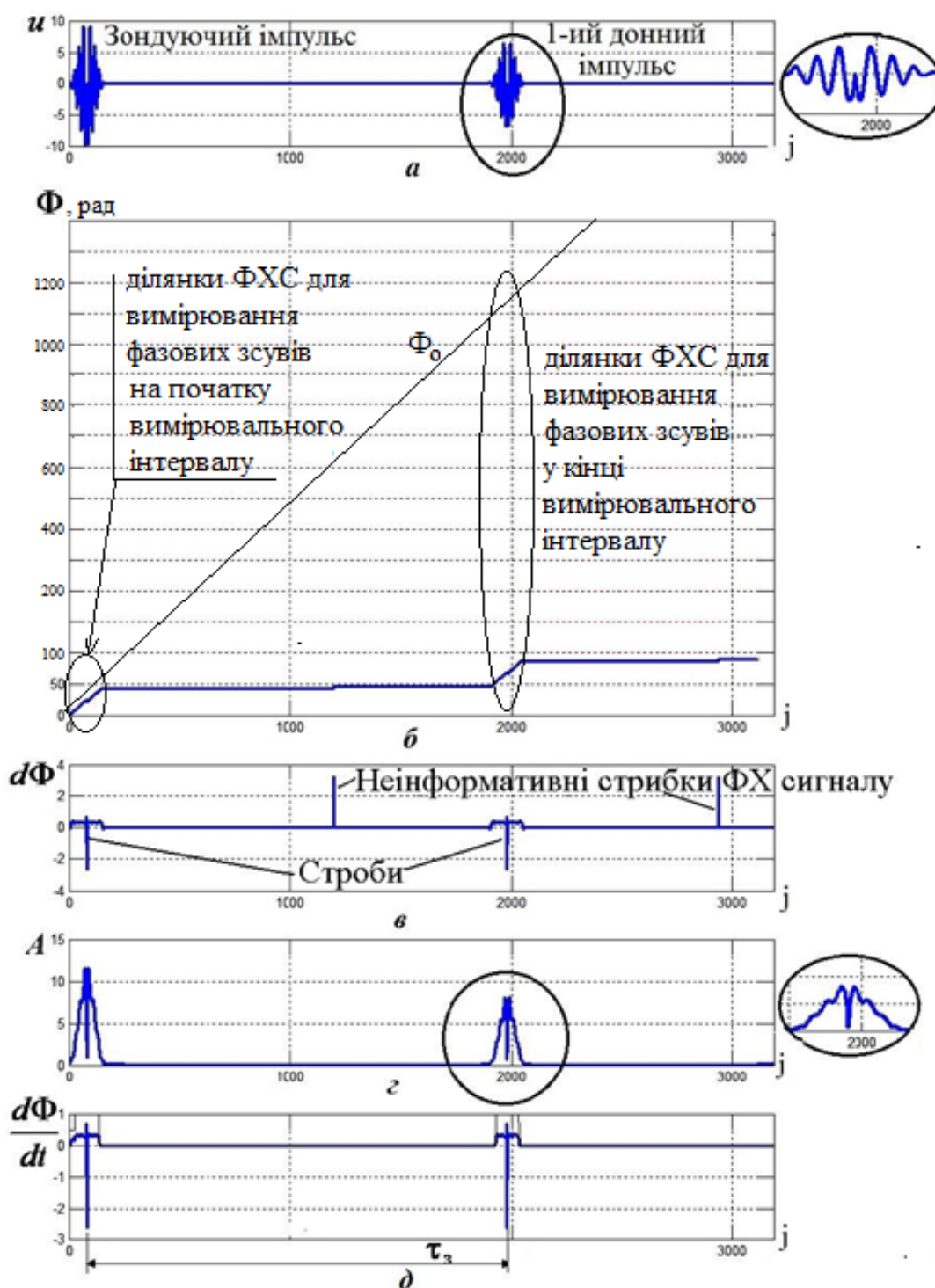


Рис. 2.7. Результати моделювання сигналів УЗТ та визначення його фазової характеристики за двошкальним методом в середовищі Matlab

епюра в – графік стрибків значень ФХС разом зі стробами, необхідними для селекції інформаційних стрибків ФХС;

епюра г – графік амплітудної характеристики сигналу УЗТ;

епюра д – графік інформативних стрибків ФХС, за якими відбувається грубе визначення затримки сигналу.

Перевагою представленого двошкального методу лунаїмпульсної УЗТ є те, що і грубе, і уточнююче значення часового інтервалу визначаються на єдиній методологічній основі за фазовою характеристикою лунаісигналів без зміни частоти сигналу-носія, що не потребує розширення робочої смуги частот товщиноміра.

Виконані комп'ютерні обчислювальні експерименти на заданих моделях сигналів дозволили відпрацювати програмну реалізацію процесу оброблення фазоманіпульшованих сигналів УЗТ і підтвердити ефективність двошкального фазового способу лунаїмпульсного методу УЗТ для підвищення точності визначення затримки інформаційних сигналів і в цілому – товщини виробів.

В реальних системах сигнали УЗТ спостерігаються на фоні адитивних шумів. В наступному комп'ютерному вимірювальному експерименті працездатність метода була перевірена на суміші сигналу з гаусовим шумом.

Результати моделювання процесу оброблення зашумлених сигналів в структурі рис.2.6 наведені на рис.2.8.

На рис.2.8 а наведено графік функції $u(t)$ – адитивної суміші двох донних сигналів у вигляді радіоімпульсів з гаусовою обвідною і гармонічним сигналом-носієм частотою $f = 5\text{МГц}$ та гаусового шуму з дисперсією 0,5 (у відносних одиницях). Відношення сигнал/шум (с/ш) визначалось як відношення максимального значення обвідної радіоімпульса до середньоквадратичного значення шуму $\sigma = \sqrt{0,5} \approx 0,71$. Для першого донного імпульсу це відношення становило $(\text{с/ш})_1=5$, а для другого імпульсу – $(\text{с/ш})_2=3,8$. На рис.2.8 б показано графік різниці Φ фазової характеристики сигналу $u(t)$ та фази гармонічного сигналу частотою f , а на рис.2.8 в – графік похідної $\frac{d\Phi}{dt}$, на якому позначено інформативні стрибки значень ФХС, суміщені в часі зі стробами, отриманими за обвідними сигналу А. Графік обвідної сигналу $u(t)$ наведено на рис.2.8 г.

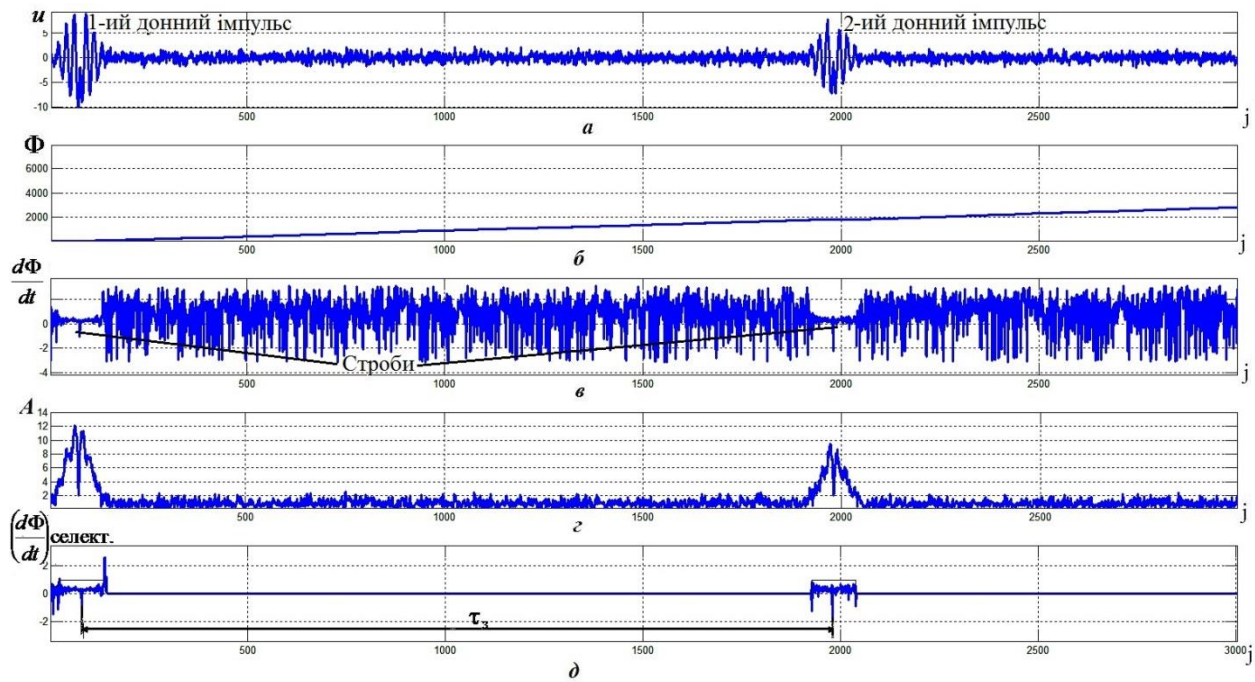


Рис.2.8. Результати моделювання процесу опрацювання сигналів УЗТ за двошкальним методом ультразвукової товщинометрії для адитивної суміші донних сигналів та гаусового шуму

Вимірюваний інтервал часу τ_z , як і в попередньому випадку, формується за інформативними стрибками ФХС, що отримуються з функції $\frac{d\Phi}{dt}$.

Зі співставного аналізу рис.2.8 г та рис.2.8 в видно, що у випадку спостереження донних сигналів на фоні завади обвідна сигналу є більш вразливою щодо її спотворення шумами, тому визначення τ_z за обвідною супроводжується значно більшими похибками.

Назагал у серії зі 100 експериментів використання двошкального методу дало змогу підтвердити зменшення абсолютної похибки формування часового інтервалу до величини $\pm 0,2T_d$ вимірювання, що підтверджує ефективність запропонованого двошкального методу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв.

Програма, що реалізує опрацювання сигналів за двошкальним методом лунаїмпульсної УЗТ наведена у Додатку Г.

2.4 Структурна схема розробленого засобу ультразвукової товщинометрії

Враховуючи переваги методів УЗТ, розроблених в п.п. 2.2 та 2.3, була створена структурна схема засобу для практичної реалізації вищезазначених методів. Загальна структурна схема такого засобу наведена на рис. Рис.2.9

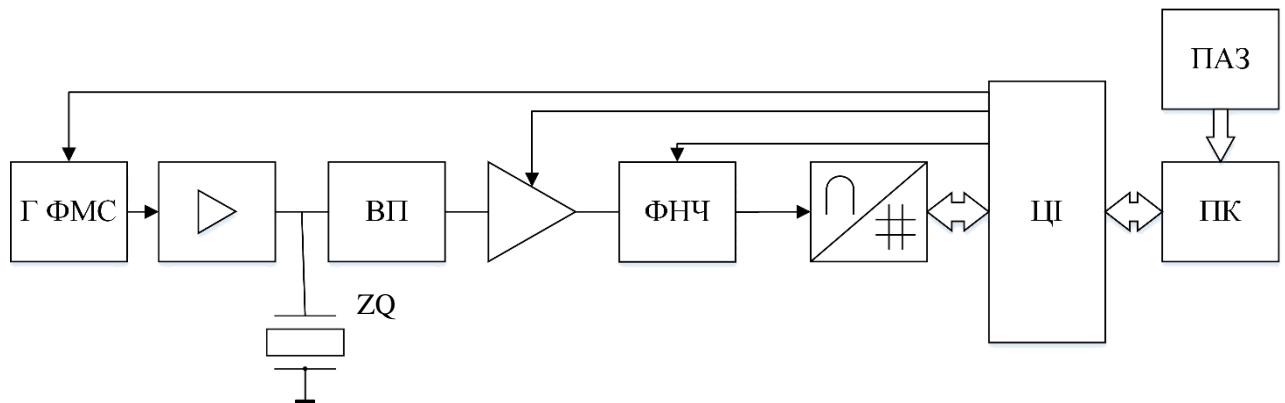


Рис.2.9. Структурна схем розробленого засобу УЗТ

Г ФМС – генератор фазоманіпульованих сигналів, ВП – вхідний пристрій, ФНЧ – фільтр нижніх частот, ЦІ – цифровий інтерфейс, ПК – персональний комп’ютер, ПАЗ – програмно-алгоритмічне забезпечення.

Схема працює наступним чином. Генератор фазоманіпульованих сигналів (Г ФМС) формує зондуючі електричні сигнали з фазовою маніпуляцією для збудження ультразвукових коливань у перетворювачі, які попередньо підсилюються. Високочастотні механічні коливання вводяться в ОК. Відбиті від донної поверхні ОК коливання перетворюються в п’єзоперетворювачі в електричні сигнали, які надходять на вхідний пристрій (ВП), який узгоджує вхідний опір перетворювача. Також ВП має в своєму складі схему блокування сигналів з генератора для захисту пристрою під час випромінювання зондуючих імпульсів високої напруги. Далі сигнали підсилюються, проходять фільтрацію в ФНЧ та надходять в АЦП. Отримані цифрові сигнали передаються в ПК для подальшої обробки за допомогою програмно-алгоритмічного забезпечення.

Керування структурними елементами засобу УЗТ – генератором, підсилювачем та ФНЧ відбувається за допомогою цифрового інтерфейсу на базі ПК.

Висновки до розділу

1. Підвищення метрологічних характеристик засобів УЗТ можливе на основі використання новітніх інформаційних технологій в сукупності з методами цифрової обробки сигналів та досягнень у галузі ультразвукової перетворювальної техніки.

2. Один з напрямів удосконалення методів і засобів УЗНК пов'язаний з використанням зондуючих сигналів більш складної структури, оскільки прості сигнали не здатні задовольнити зростаючі вимоги щодо точності вимірювань та вірогідності контролю.

3. Запропоновано амплітудно-фазовий лунаїмпульсний метод ультразвукової товщинометрії, який ґрунтується на використанні модифікованого за допомогою фазової маніпуляції сигналу-носія зондуючого сигналу та подальшому аналізі фазових характеристик зондуючого та відбитого сигналів. Метод передбачає використання короткотривалих (два – чотири періоду сигналу-носія) ФМ-сигналів для зменшення похибки виділення сигналів УЗТ. Розглянута реалізація методу ґрунтується на використанні дискретного перетворення Гільберта сигналів УЗТ.

4. Проведені модельні дослідження довели можливість використання стрибків фазової характеристики зондуючого і донних сигналів після їх поширення в електроакустичному тракті для прецизійного вимірювання часу затримки ультразвукового сигналу та дозволили розробити методику реалізації запропонованого методу УЗТ.

5. Запропоновано удосконалення амплітудно-фазового методу УЗТ з використанням ФМ-сигналів за рахунок уточнення отриманої часової затримки шляхом вимірювання і врахування фазових зсувів сигналу-носія. Такий двошкальний метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів-носіїв дав змогу зменшити

абсолютну похибку формування і вимірювання часового інтервалу до величини $\pm 0,2T_d$.

Перевагою двошкального методу є те, що і грубе, і уточнююче значення часового інтервалу визначається на єдиній методологічній основі – за фазовою характеристикою сигналів УЗТ без зміни частоти сигналу-носія, що не потребує розширення робочої смуги частот товщиноміра.

6. Виконані комп'ютерні обчислювальні експерименти на заданих моделях сигналів дозволили відпрацювати програмну реалізацію процесу опрацювання фазоманіпульованих сигналів УЗТ і підтвердити ефективність двошкального лунаїмпульсного методу УЗТ для підвищення точності визначення затримки інформаційних сигналів і в цілому для підвищення точності вимірювання товщини виробів.

7. Розроблене програмне забезпечення може бути використано як автономно, так і у складі програмно-апаратних засобів ультразвукової товщинометрії.

8. Запропонований метод визначення затримки поширення ультразвукових сигналів може бути використаний для прецизійного вимірювання швидкості ультразвукових коливань у досліджуваних матеріалах.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЛУНАІМПУЛЬСНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ЗА РАХУНОК СТАТИСТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ-НОСІЯ

Розглянутий в розділі 2 метод УЗТ, що ґрунтується на визначенні часового інтервалу за результатами аналізу фазової характеристики сигналу-носія з фазовою маніпуляцією, має низьку завадозахищеність. Його застосування виявляється ефективним за відношення $c/\text{ш} > 10$. В той же час існує значна кількість конструкційних матеріалів зі значним загасанням пружних коливань. Дослідження виробів з таких матеріалів за допомогою лунаїмпульсної УЗТ потребує застосування спеціальних методів опрацювання сигналів, які орієнтовані на вимірювання товщини виробів за відношення $c/\text{ш} < 10$ та за прийнятної втрати точності.

В цьому розділі запропоновано удосконалення розглянутого раніше методу УЗТ, що ґрунтується на використанні сигналу-носія з фазовою маніпуляцією шляхом його доповнення статистичним опрацюванням фазових характеристик сигналів УЗТ. Це дає змогу оцінювати часовий інтервал за положенням в часі r -статистики, яка визначається за фазовою характеристикою сигналу-носія. Такий спосіб виділення і вимірювання часового інтервалу має підвищену завадостійкість.

Основні результати опубліковані в роботах [85, 100, 101].

3.1 Оцінювання завадостійкості в засобах лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії

Сигнали лунаїмпульсної УЗТ спостерігаються на фоні завад, які мають різну фізичну природу і в залежності від їх рівня можуть призводити до значних втрат вимірювальної інформації. Загалом задачі збереження та оцінювання працездатності технічних систем у присутності завад виникають у різних технічних застосуваннях. Для характеристики якості методів і засобів

отримання, передавання і опрацювання інформації та оцінювання ефективності різних систем управління та вимірювання, функціонування яких відбувається за наявності різного роду завад, користуються поняттям завадостійкості [59, 102, 103].

В широкому розумінні завадостійкість – це поняття, яке характеризує здатність системи протистояти спотворюючій дії-заваді правильно сприймати інформацію. Завдання неспотвореного відновлення інформації виникає тому, що інформаційні сигнали (тобто сигнали, один чи декілька параметрів яких містять певну корисну інформацію) зазвичай мають обмежену енергію і спостерігаються на фоні завад. Наприклад, в радіотехнічних системах носіями корисної інформації виступають електромагнітні хвилі радіо діапазона [104]. Процес поширення сигналу і відновлення переданої інформації супроводжується дією завад різної природи – атмосферних, індустріальних, міжсистемних, навмисних, шумів апаратури тощо.

В системах передавання інформації наявність завад може привести не тільки до помилок, що виникають в процесі приймання інформації, але й до повної втрати працездатності. За наявності флуктуаційної завади має місце формула Шеннона[105]:

$$C = F \cdot \lg \left(1 + \frac{P_c}{P_3} \right); \quad (3.1)$$

де F – частотна смуга пропускання системи,

P_c, P_3 – відповідно потужності сигналу і завади,

C – гранична пропускна спроможність системи (тобто пропускна спроможність системи, яка за заданих значеннях P_c, P_3 і F забезпечує її функціонування з нехтовно малою ймовірністю помилки).

Формула (3.1) вказує на те, що гранична пропускна спроможність системи зменшується зі збільшенням рівня завад і навпаки необмежено зростає за його зменшенням. В системах передавання інформації, що працюють з бінарним кодом, в якості критерію завадостійкості застосовують імовірність помилки [59, 105].

В радіолокаційних та радіонавігаційних системах [103] за кількісну оцінку завадостійкості прийнято відношення потужності сигналу до потужності завади на вході системи, $\frac{P_c}{P_z}$ за якого похибка вимірювання заданого параметра не перевищує певного допустимого порога із необхідною ймовірністю.

Якщо інформація передається методом безперервних повідомлень, то застосовують критерій покращення відношення сигнал/шум (с/ш) на виході системи по відношенню до такого ж відношення на його вході

$$E = \frac{(c/ш)_{вих}}{(c/ш)_{вх}}. \quad (3.2)$$

У випадку отримання і передавання неперервним методом вимірювальної інформації найчастіше використовують критерій, що ґрунтується на обчисленні відношення середньоквадратичного відхилення прийнятого повідомлення відносно переданого до середньоквадратичного значення переданого повідомлення.

Для підвищення завадозахищеності використовують різні апаратні та програмно-алгоритмічні ресурси. До їх кола належать використання електронних пристроїв з низьким рівнем власних шумів, частотної фільтрації, завадостійкого кодування, спеціальних коригуючих кодів, здатних виявляти і виправляти помилки роботи системи, статистичних методів опрацювання даних та ін.

В ряді практичних задач розв'язати завдання підвищення завадозахищеності вдається на основі використання певних відомих відмінностей між сигналом і завадою, зокрема відмінностей між їх статистичними характеристиками. Ця особливість використана і в фазовому методі виявлення сигналів УЗТ [14, 64]. Його особливість полягає в тому, що на вхід виявляча поступає електричний сигнал, для якого відношення с/ш визначається за енергетичними характеристиками сигналу (потужністю або енергією донного сигналу), а рішення про наявність сигналу та оцінювання його часового положення формується за результатом аналізу отриманої з неенергетичної ФХС

на виході фазового виявляла іншої характеристики – статистики r [55]. Ця статистика є неенергетичною і не має розмірності. Статистика r набуває значень на інтервалі $(0, 1]$ і в літературі з питань статистичного аналізу кутових даних називається ще вибірковою результуючою довжиною вектора [65-67]. Її фізичний зміст буде розглянуто нижче.

Для кількісної оцінки ефективності фазової статистичної обробки в задачах виявлення радіосигналів з гармонічною несучою на фоні шуму у порівнянні з амплітудним методом обґрунтовано показник ефективності, який запропоновано та досліджено в роботах [14, 101]. Його сутність полягає в наступному.

Нехай аналізу піддається сигнал, моделлю якого є адитивна суміш корисного сигналу УНТ у вигляді періодичної (з періодом повторення τ , що залежить від товщини ОК та швидкості поширення ультразвукових коливань в матеріалі ОК) послідовності відбитих (донних) радіоімпульсів і реалізації гаусового шуму виду

$$u_d(t) = \sum_{i=1}^I K_{\text{ЕАТ},i} \cdot u_z(t - \tau_1 - (i-1)\tau) + u_{\text{ш}}(t), i = \overline{1, I}, t \in [0, T_a] \quad (3.3)$$

де $K_{\text{ЕАТ},i}$ – коефіцієнти електроакустичного тракту для i -того донного імпульсу,

τ_1 – затримка першого донного імпульсу відносно зонduючого,

T_a – час аналізу сигналу,

$u_{\text{ш}}$ – реалізація гаусового шуму $\xi(t)$ з нульовим математичним сподіванням та дисперсією $\sigma_{\text{ш}}^2$.

Відношення с/ш для i -го донного імпульсу (тобто відношення с/ш на вході виявляча сигналів) визначається величиною $U_{\text{max},i}/\sigma_{\text{ш}}$, де $U_{\text{max},i}$ – максимальне значення обвідної i -того донного імпульсу.

Відношення с/ш на виході виявляча сигналів визначається як відношення максимального значення статистики $r_{\text{max},i}$ для i -го донного сигналу до середньо квадратичного відхилення цієї статистики σ_r на ділянках, що не містять донних імпульсів.

Ефективність E оцінюється за збільшенням відношенням

$$E = \left(\frac{c}{\sigma_{\text{ш}}} \right)_{\text{вих}} / \left(\frac{c}{\sigma_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх}} = \frac{r_{\text{max},i} / U_{\text{max},i}}{\sigma_r / \sigma_{\text{ш}}} \quad (3.4)$$

Фрагмент графіку $r[j]$, отриманої на виході фазового виявляла з дискретним часом показано на рис. 3.1.

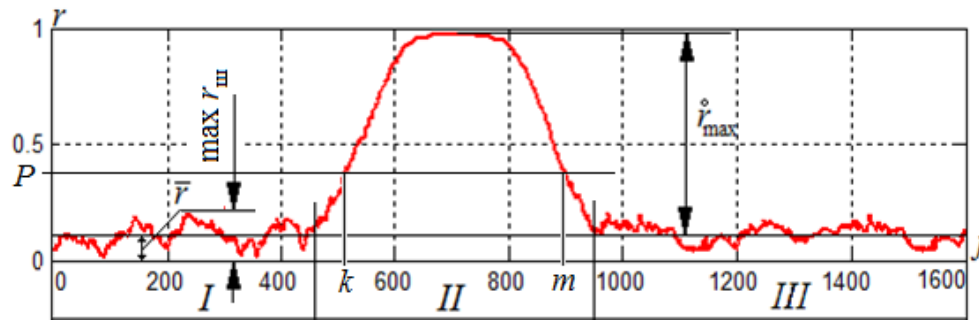


Рис. 3.1. Фрагмент графіку $r[j]$, що пояснює формування відношення $(c/\sigma_{\text{ш}})_{\text{вих}}$ на виході фазового виявляла донних сигналів

Представлений на рис.3.1 графік r -статистики умовно поділений на три частини: перша і третя (I, III) відповідають шумовій складовій сигналу (лунаїмпульс відсутній); друга частина – адитивній суміші луна сигналу УЗТ і шуму.

У випадку понижених відношень $\left(\frac{c}{\sigma_{\text{ш}}} \right)_{\text{вих}}$ середнє значення r -статистики (\bar{r}) зростає, тому відношення сигнал/шум на виході імпульсу) більш коректно визначати за центрованою r -статистикою як

$$\left(\frac{c}{\sigma_{\text{ш}}} \right)_{\text{вих}} = \frac{r_{\text{max},i} - \bar{r}}{\sigma_r} \quad (3.5)$$

3.2 Аналіз базового методу лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії з використанням статистичного опрацювання фазових характеристик сигналів

Завдання підвищення вірогідності виявлення сигналів УЗТ та зменшення похибок вимірювання часових інтервалів τ в ряді завдань УЗТ вирішується за

рахунок підвищення потужності зондуючих сигналів або збільшення кількості вимірювальної інформації, що досягається певним збільшенням часу аналізу сигналу. Практична реалізація таких методів має певні обмеження і не завжди є прийнятною.

В той же час слід зазначити, що можливості УЗТ визначаються не тільки способом формування інформаційних сигналів в системі «ультразвуковий перетворювач – ОК», але й вибраними інформативними параметрами і характеристиками сигналу та методом їх опрацювання. В роботах [14, 55, 78] запропоновано метод УЗТ, що реалізує принцип фазового виявлення радіосигналів у радіолокації [106] в сукупності з використанням положень статистичної фазометрії [55]. Далі цей метод називається базовим методом фазової статистичної ультразвукової товщинометрії (або просто базовим методом).

Нижче цей метод розглянуто більш детально для більш повного розуміння його удосконалення та оцінювання підвищення ефективності запропонованих технічних рішень.

Постановка задачі. Загалом задача виявлення сигналів УЗТ та вимірювання часу затримки між донними сигналами, що сформовані під час поширення ультразвукових коливань в матеріалі ОК, формулюється наступним чином. Визначається товщина ОК, який виготовлено з матеріалу зі значним загасанням ультразвукових коливань, ультразвуковим лунаїмпульсним методом. Введення/виведення ультразвукового сигналу в/з ОК відбувається за допомогою суміщеного п'єзоелектричного перетворювача. Зондування ОК здійснюється радіоімпульсним сигналом. Типовою моделлю $S_{yK}(t)$ сигналу УЗТ є послідовність радіоімпульсів з гармонічним сигналом-носієм та гаусовою обвідною

$$S_{yK}(t) = \sum_{i=1}^I K_{EAT,i} \cdot S_{IMП}(t - 2i\tau_i), t \in [0, T_a], t_0 = 0, K_{EAT,i} = 1 \quad (3.6)$$

$$S_{IMП}(t, i = 0) = S(t) \cdot \sin(2\pi f t), t \in [0, \tau_{IMП}] \quad (3.7)$$

Де $S_{\text{ИМП}}(t)$ – випромінений радіоімпульс,

$S(t)$ – гаусоподібна обвідна радіоімпульсу,

$\tau_{\text{ИМП}}$ – тривалість радіоімпульсу,

f – частота сигналу-носія,

$K_{\text{ЕАТ},i}$ – коефіцієнт електроакустичного тракту для i -го імпульсу,

I – кількість спостережуваних імпульсів,

τ_i – часовий інтервал між суміжними радіоімпульсами (τ_1 – часовий інтервал між імпульсом збудження і першим донним імпульсом, включає час на поширення сигналу в ОК та шарі імерсійної рідини, $\tau_i, i = \overline{2, I}$ – часові інтервали між i -тим та $(i-1)$ – м імпульсами, які дорівнюють часу поширення сигналу в матеріалі ОК від поверхні до дна ОК в обох напрямках).

В послідовності імпульсів (3.6) перший імпульс ($i=0$) – імпульс збудження випромінювача, а наступні – донні лунаімпульси, що виникають внаслідок відбиття коливань від протилежних сторін виробу.

В реальній системі сигнал УЗТ (3.6) спостерігається на фоні адитивного шуму. Цей шум складається з шуму вхідних електронних трактів товщиноміра, п'єзоелектричного перетворювача, електромагнітних наведень у електричних ланцюгах тощо. Тому модель сигналу з урахуванням шумової складової представляється, як реалізація випадкового процесу у вигляді адитивної суміші виду

$$s'_{\text{ук}}(t) = s_{\text{ук}}(t) + s_{\text{ш}}(t), \quad (3.8)$$

де $s_{\text{ш}}(t)$ – реалізація гаусового шуму $\xi(t)$ з нульовим математичним сподіванням і дисперсією $\sigma_{\text{ш}}^2$. Вважається, що функція (3.8) належить простору L_2 , тобто $\int |s'_{\text{ук}}(t)|^2 dt < \infty$, що позначається як $s'_{\text{ук}}(t) \in L_2$, отже для $s'_{\text{ук}}(t)$ існує перетворення Гільберта.

Завдання виявляча сигналів полягає у розрізненні двох ситуацій:

- 1) аналізована ділянка сигналу містить адитивну суміш донного сигналу і шуму;
- 2) аналізована ділянка сигналу містить тільки шумову складову

$$s'_{\text{ук}}(t) = \begin{cases} K_{\text{EAT},i} s_{\text{ИП}}(t - 2i\tau_i) + s_{\text{ш}}(t) \\ s_{\text{ш}}(t). \end{cases} \quad (3.9)$$

Завданням вимірювача часових інтервалів є формування оцінки $\hat{\tau}$ між суміжними донними імпульсами.

Загальна схема формування сигналів УЗТ наведена на рис. 3.2. На цій схемі G – генератор зонduючих сигналів, $K_{\text{EAT},i}$ – елемент множення, що враховує загасання i -того донного імпульсу в ОК, $\tau_1 + (i - 1)\tau$ – елемент затримки i -того донного імпульсу відносно зонduючого.

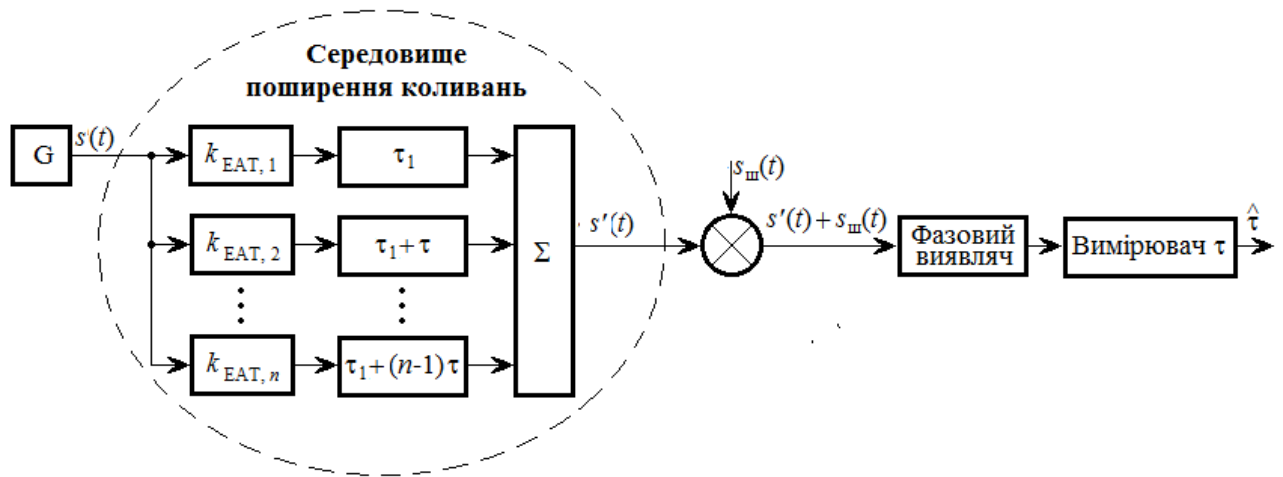


Рис. 3.2. Схема формування сигналів УЗТ

Для порівняння ефективності різних варіантів реалізації методу лунаїмпульсної УЗТ представимо відношення сигнал/шум на виході п'єзоелектричного перетворювача для i -того імпульсу формулою

$$\left(\frac{c}{\text{ш}}\right)_{\text{вх}} = \frac{K_{\text{EAT},i} S_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ш}}} \quad (3.10)$$

де S_{max} – максимальне значення обвідної.

Базовий метод виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії [14, 64] ґрунтується на виявленні донних імпульсів за поточними значеннями r -статистики, яка визначається з фазових характеристик сигналу УЗТ [55]. З відомих кругових статистичних характеристик вибіркова результуюча довжина вектору r є найбільш прийнятною для розв'язання задачі виявлення сигналів та

оцінювання їх положення в часі оскільки, по-перше, є інваріантною до початкової фази сигналу, по-друге, має наочну графічну інтерпретацію. Ознакою присутності/відсутності сигналу є зміна значень різниці фазової характеристики сигналу (3.8) та фазової характеристики сигналу-носія (3.7), а отже, і значень вибіркової результуючої довжини вектора r , що дозволяє виявити сигнали $s_{yk}(t)$ в суміші (3.8) навіть на фоні значних завад. Більші значення статистики r відповідають випадку наявності лунасигналів, а менші – відсутності лунасигналу. Отже аналіз значень r дає змогу виявляти корисні сигнали УЗТ на фоні адитивного шуму.

Базовий метод реалізується в дискретному варіанті послідовністю виконання таких етапів:

1. До дискретної реалізації сигналу (3.7) – $s'_{yk}[j]$, заданого на часовій ґратці $[T_d, 2T_d, \dots, jT_d, \dots, JT_d]$, застосовують дискретне перетворення Гільберта (\mathbf{H}_d) [55, 75, 76] і отримують його гільберт-образ $\hat{s}_{yk}[j]$:

$$\hat{s}_{yk}[j] = \mathbf{H}_d(s'_{yk}[j]), \quad (3.11)$$

Де $j = \overline{1, J}$, $J = \frac{T_a}{T_d}$, T_d – період дискретизації сигналу УЗТ.

2. Знаходять розгорнуту фазову характеристику сигналу (ФХС):

$$\Phi[j] = \mathbf{K} \left(\arctg \left(\frac{\hat{s}_{yk}[j]}{s'_{yk}[j]} \right) + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sign}(\hat{s}_{yk}[j]) \cdot (1 + \text{sign}(s'_{yk}[j])) \right\} \right) \quad (3.12)$$

де $\text{sign}[j]$ – знакова функція, \mathbf{K} – оператор розгортання фазової функції за межі інтервалу $[0, 2\pi]$ [55].

3. Знаходять різницю дискретної функції $\Phi[j]$ та фазової характеристики гармонічного коливання виду $s_0[j] = \sin(2\pi f j T_d + \varphi_0)$ з частотою f сигналу-носія

$$\varphi[j] = \Phi[j] - 2\pi f T_d j - \varphi_0, \quad j = \overline{1, J} \quad (3.13)$$

де $\varphi_0 \in [0, 2\pi]$ – випадкова початкова фаза гармонічного коливання, розподілена рівномірно в інтервалі $[0, 2\pi]$.

4. Обчислюють поточні значення статистики r в ковзному режимі під час руху прямокутного вікна з апертурою $(2M_r+1)$ відносно вибірки $\varphi[j]$.

На кожному j -тому кроці аналізу піддається сукупність значень

$$\Theta[k, M_r] = \{\varphi[k], k \in \overline{j - M_r, j + M_r}, j \in M_r, J - M_r\}. \quad (3.14)$$

Поточне значення статистики r визначають у відповідності до виразу

$$r[j, M_r] = \frac{1}{2M_r + 1} \sqrt{\left(\sum_{k=j-M_r}^{j+M_r} \cos \varphi[k] \right)^2 + \left(\sum_{k=j-M_r}^{j+M_r} \sin \varphi[k] \right)^2}, \quad (3.15)$$

5. Знаходять часові положення донних імпульсів, як «центри мас» q ділянок r -статистики, що відповідають луна-сигналам та сигналу збудження. Центр мас імпульсів визначається за формулою:

$$q = \sum_{j=k}^m j \cdot r[j] / \sum_{j=k}^m r[j] \quad (3.16)$$

де k та m – значення змінної j , що відповідає початку та кінцю інтервалу, на якому досліджується статистика $r[j]$ (див. рис.3.1).

Значення k та m вибираються з умови

$$k = j: \left\{ \frac{r[j+1] \leq P}{r[j-1] > P} \right\}; \quad m = j: \left\{ \frac{r[j+1] > P}{r[j-1] \leq P} \right\}. \quad (3.17)$$

Значення P вибирається з умови його гарантованого перевищення шумової складової (рис.3.1) статистики $r[j]$, наприклад

$$P = (\max r_{\text{ш}}) \cdot k_3; \quad (3.18)$$

де $\max r_{\text{ш}}$ – максимальне значення статистики $r[j]$ на ділянках, де відсутній луна-сигнал, $k_3 \in (1, 1 \div 1,5)$ – коефіцієнт запасу.

За виконання умови $r[j, M_r] > P$ приймають рішення про наявність радіоімпульсу та визначають його цент (3.16).

Структура процесу отримання поточних значень r -статистики в ковзному режимі наведена на рис.3.3.

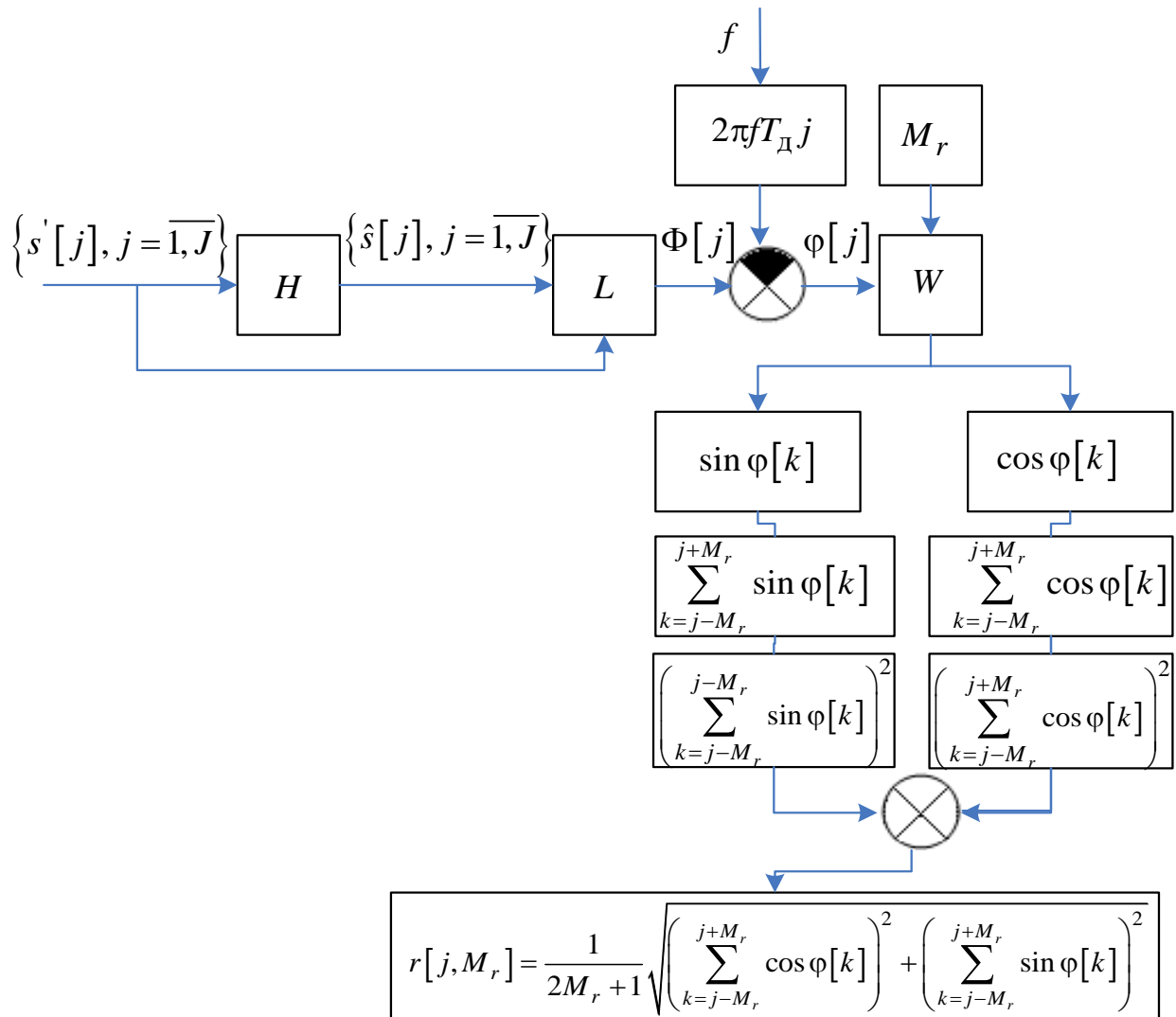


Рис. 3.3. Структура процесу отримання r -статистики:

H – оператор перетворення Гільберта, L – оператор визначення фази сигналу,

W – оператор віконного опрацювання даних

Графічне представлення ідеї базового методу УЗТ з визначенням часових інтервалів за функцією $r[j]$ подано на рис. 3.4.

З формул (3.15), (3.17) витікає, що для збільшення точності визначення $q[i]$ (отже і для більш точного оцінювання часових інтервалів) необхідно зменшувати граничний рівень P . В свою чергу значення P пропорційне рівню статистики r

на ділянці де присутня тільки шумова складова сигналу. Для зменшення рівня P доцільно застосовувати додаткову фільтрацію послідовності $r[j]$.

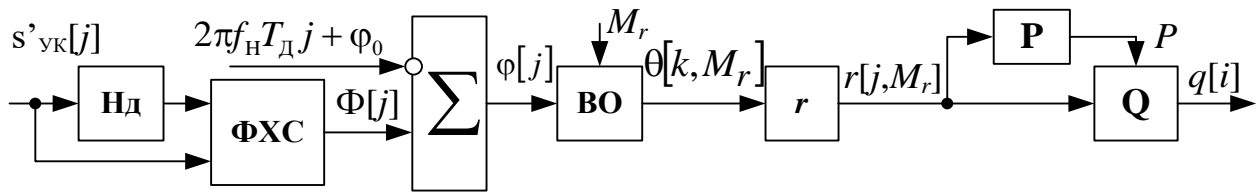


Рис. 3.4. Структурно-логічна схема фазового методу виявлення сигналів УЗТ на основі аналізу функції $r[j, M_r]$

Для елементів схеми використано наступні позначення:

Нд – оператор дискретного перетворення Гільберта,

ФХС – модуль визначення ФХС,

Σ – модуль визначення $\varphi[j]$,

ВО – модуль віконного опрацювання та визначення $\theta[k, M_r]$,

r – модуль визначення поточних значень статистики r ,

P – модуль визначення порогу P ,

Q – модуль прийняття рішення про наявність радіоімпульсу та визначення його центру $q[i]$.

Ефективність базового методу було розглянуто в роботі [101] на прикладі аналізу отриманих реальних сигналів УЗТ. В якості зонduючого сигналу використовувався радіоімпульсний сигнал виду (3.7), з гаусоподібною обвідною і частотою сигналу-носія $f = 2,3$ МГц. Дискретизація сигналів УЗТ виконувалася з частотою $f_d = 50$ МГц, в результаті отримувалась вибірка значень обсягом $N = 15000$. Середньоквадратичне значення шуму $\sigma_{ш} \sim 0,019$ В, апертура ковзного вікна $M_r = 43$.

Отримані дані представлені на рис.3.5, на якому зображено: а – графік сигналу УЗТ; б – обвідна сигналу УЗТ; в – графік статистики $r[j, M_r]$.

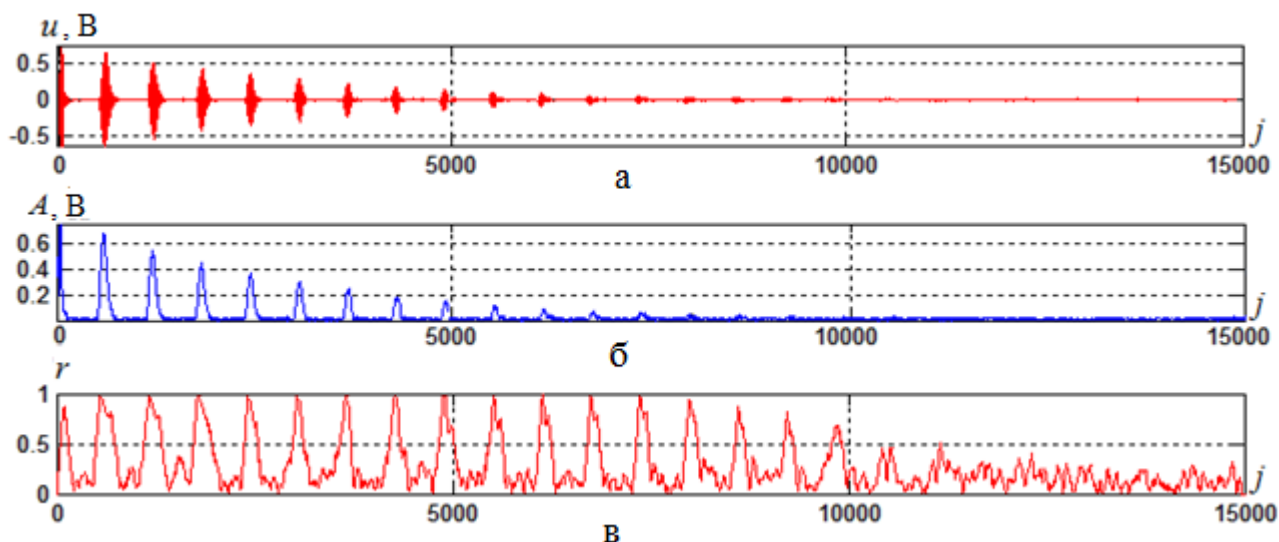


Рис. 3.5. Графіки досліджуваного сигналу (а), його обвідної (б), обчисленої за алгоритмом (2.10), та статистика $r[j, M_w]$, отриманої за (3.15)

З рис.3.5а,б видно, що послідовність донних радіоімпульсів та їх обвідні загасають за експоненціальним законом. Значення амплітуд обвідних i -тих імпульсів $S_{max,i} = k_{\text{ЕАТ},i} S_{max}$ для перших дев'яти відгуків, які впевнено виділялись на фоні шуму, становили: 0,68 В, 0,54 В, 0,44 В, 0,36 В, 0,30 В, 0,24 В, 0,19 В, 0,15 В, 0,11 В. Співставний аналіз обвідної (рис.3.5,б) і статистики $r[j, M_w]$ (рис.3.5,в) дозволив зробити висновок про те, що фазовий метод виявлення донних сигналів є більш ефективним за амплітудний, оскільки забезпечує можливість виявлення більшої кількості донних імпульсів. Дійсно, обвідна донних імпульсів починаючи з $i=10$ практично не дозволяє вирізнити наступні імпульси на фоні шуму. Натомість графік статистики $r[j, M_w]$ свідчить про те, що в даному експерименті впевнено виявляються 16 донних імпульсів. Для $i=16$ відношення с/ш становить ~ 1 . Це, в свою чергу, свідчить про можливість застосування базового методу до виробів з матеріалів зі значним загасання ультразвукових коливань.

На рис. 3.6,а показано графіки відношень с/ш для вхідного сигналу (колами) і статистики r (квадратиками), а на рис. 3.6, б – графік оцінки ефективності E , фазового методу виявлення сигналів УЗТ, яка визначається за формулою (3.4).

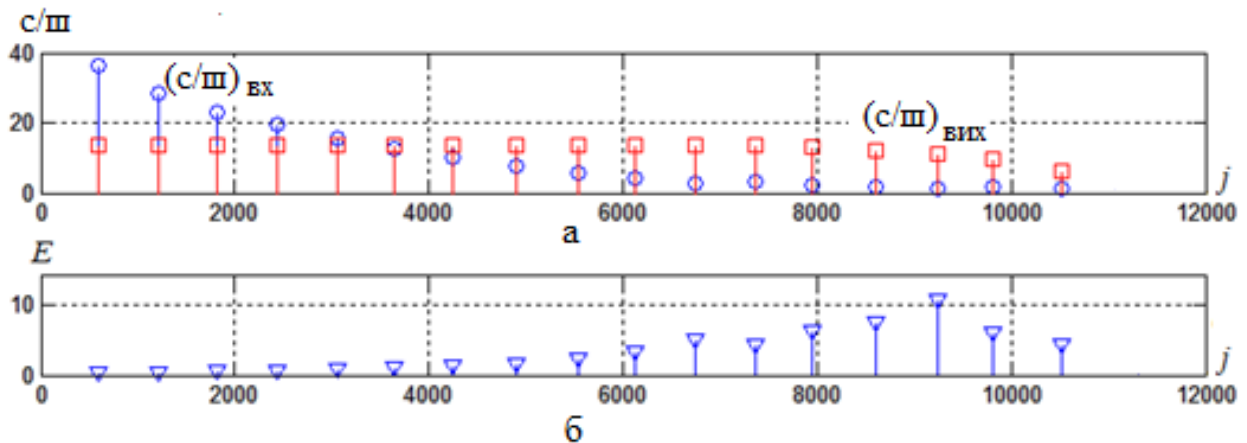


Рис. 3.6. Ефективності виявлення донних сигналів фазовим методом

З рис. 3.6 видно, що статистична обробка фазових характеристик сигналів в УЗТ для низьких відношень c/π , дає кращий результат в порівнянні з амплітудними методами, що кількісно підтверджено оцінкою ефективності фазового методу обробки даних за виразом (3.4).

Розглянутий фазовий метод виявлення сигналів УЗТ має і інші переваги, до числа яких слід віднести:

- незалежність статистики r від амплітуди досліджуваних сигналів УЗТ,
- нормованість r -статистики: $r \in (0,1]$,
- інваріантність статистики r до початкової фази досліджуваних сигналів,
- можливість використовувати одні апаратно-програмні засоби для виявлення сигналів і оцінювання їх положення в часі.

Ці та інші корисні властивості базового методу спонукали до пошуку шляхів його подальшого дослідження і удосконалення з метою підвищення ефективності виявлення донних сигналів та підвищення точності вимірювання часових інтервалів між ними.

3.3 Удосконалення базового методу ультразвукової товщинометрії за рахунок зваженого оцінювання r -статистики

З виразу (3.4) витікає, що для збільшення ефективності фазового методу виявлення донних сигналів необхідно збільшувати максимальні значення

статистики $r_{max,i}$ для i -тих донних сигналів і зменшувати середнє значення та середнє квадратичне відхилення цієї статистики σ_r на ділянках, що не містять донних імпульсів. Дослідження цих питань виконувались у такій послідовності:

1. аналіз формування статистики r ;
2. вплив апертури вікна аналізу на величину \bar{r} – середнього значення статистики r , та σ_r ;
3. формування зваженої статистики $r_{зв}$ та її співставний аналіз зі статистикою r .

Аналіз формування статистики r . За визначенням [55, 65-67] статистика r є модулем (довжиною) усередненого результуючого вектора \bar{r} , що утворений векторним підсумовуванням вибірки кутів певного обсягу на колі одиничного радіусу. Згідно з базовим методом поточні j -ті значення статистики r (3.15) визначаються під час ковзного віконного оброблення (вікном з апертурою $2M_r + 1$) вибірки різниць ФХС (3.11) $\{\varphi[j], j = \overline{1, J}\}$. Кожне j -те значення статистики $r[j, M_r]$ отримують шляхом векторним підсумовуванням вибірки $\Theta[k, M_r], k \in \overline{j - M_r, j + M_r}$ обсягу $2M_r + 1$.

Нижче на рис. 3.7. а,б відображено процес визначення $\bar{r}[j, M_r]$ для $M_r = 1$ відповідно для випадків меншого і більшого розкиду значень вибірки $\Theta[k, M_r]$. Областю значень кутів є коло одиничного радіусу з центром в точці з координатами (0, 0) декартової системи координат xOy .

Кожному з елементів вибірки $\varphi[1], \varphi[2], \varphi[3]$ – різниці ФХС, відповідає плоский кут того ж значення, який задає напрямок векторів $\overline{OP_1}, \overline{OP_2}, \overline{OP_3}$, у системі xOy . Точки P_1, P_2 та P_3 належать одиничному колу, а значення кутів відраховуються від осі Ox в напрямку проти руху годинникової стрілки.

Усереднений результуючий вектор \bar{r} має декартові координати

$$C[j, M_r] = \frac{1}{2M_r + 1} \sum_{k=j-M_r}^{j+M_r} \cos \varphi[k], S[j, M_r] = \frac{1}{2M_r + 1} \sum_{k=j-M_r}^{j+M_r} \sin \varphi[k] \quad (3.19)$$

а статистика r визначається як

$$r[j, M_r] = |\bar{r}[j, M_r]| = \sqrt{C^2[j, M_r] + S^2[j, M_r]}. \quad (3.20)$$

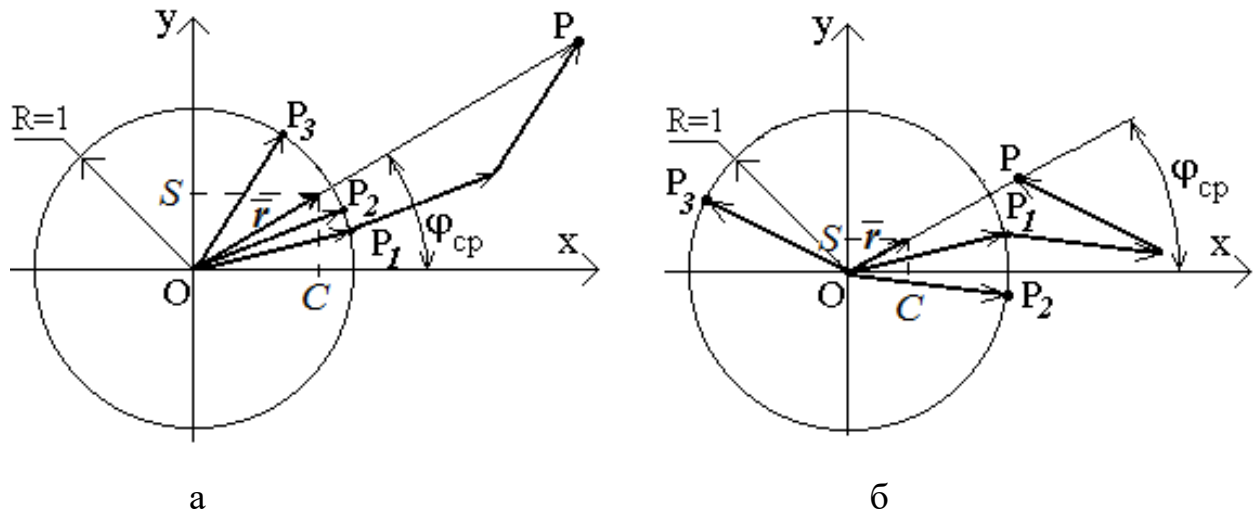


Рис. 3.7. Формування вектора \bar{r} за різної дисперсії кутів

Аргумент вектора $|\bar{r}[j, M_r]|$ є поточним значенням вибіркового кругового середнього, яке визначається в інтервалі $[0, 2\pi)$ за алгоритмом [65]

$$\varphi_{cp}[j, M_r] = \arctg \frac{S[j, M_r]}{C[j, M_r]} + \frac{\pi}{2} \{2 - (\text{sign} S[j, M_r]) \cdot (1 + \text{sign} C[j, M_r])\}. \quad (3.21)$$

Далі для скорочення запису позначатимемо оператор визначення вибіркового кругового середнього як \mathbf{L} , тобто

$$\varphi_{cp}[j, M_r] = \mathbf{L}(S[j, M_r], C[j, M_r]). \quad (3.22)$$

З умови визначення $\varphi[j]$ як різниць ФХС (3.12) витікає, що на ділянці сигналу УЗТ з донним імпульсом розкид значень $\varphi[j]$ є значно меншим, а на ділянках з шумом $\varphi[j]$ розосереджені по всьому інтервалу $[0, 2\pi)$. Ці два випадки власне і ілюструють рис. 3.7 а, б.

В теорії статистичного аналізу кутових даних в якості характеристики розсіювання прийнято вибіркoву кругову дисперсію, яка пов'язана зі статистикою r простим співвідношенням

$$V[j, M_r] = 1 - r[j, M_r] \quad (3.23)$$

Важливою властивістю V і r є їх незалежність від вибору напрямку відліку кутів. Дійсно, їх значення лишається незмінним у випадках їх розрахунку за вибірками $\{\varphi[j], j = \overline{1, J}\}$ та $\{\varphi[j] + v, j = \overline{1, J}, v \in [0, 2\pi)\}$.

Більші значення $r[j, M_r]$ вказують на меншу дисперсію кутових (фазових) даних, що відібрані вікном аналізу з апертурою M_r і відповідають випадку наявності сигналів, а менші значення $r[j, M_r]$ – випадку відсутності сигналу. Отже за значеннями $r[j, M_r]$ можна виявляти корисні сигнали УЗТ і визначати їх поточне положення в часі. Ознакою присутності чи відсутності сигналу є зміна значень $\varphi[j]$ (3.12) у вікні аналізу в інтервалі, що перевищує значення 2π . Ця зміна трансформується у зміну вибіркової результуючої довжини вектора $r[j, M_r]$, що дозволяє виділити сигнали на фоні значних шумів [54, 55, 79, 98, 99].

Аналіз впливу апертури вікна M_r на величину r та σ_r . Розглянемо вплив розміру апертури вікна M_r на величину статистики r та її дисперсію. Дослідження проводились у формі комп'ютерного моделювання в середовищі Matlab за наступною методикою.

1. Генерація гаусового шуму $s'_{\text{ук}}(t) = s_{\text{ш}}(t)$ за допомогою функції $\text{randn}()$ яка формує масив випадкових чисел обсягу J , що розподілені за нормальним законом з нульовим математичним сподіванням і середньоквадратичним відхиленням 1 В. Реалізація шуму для $J = 10000$, $T_{\text{д}} = 2$ нс наведена на рис. 3.8.

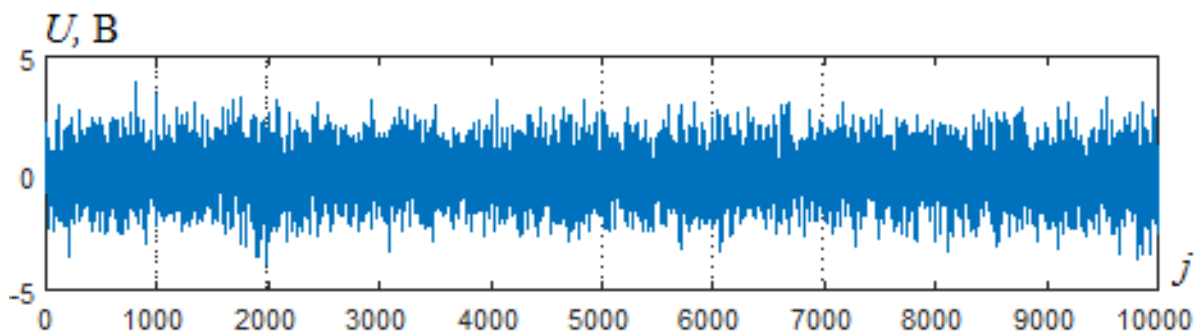


Рис. 3.8. Графік вибірки шуму

2. До отриманої вибірки шуму застосовується дискретне перетворення Гільберта і отримується гільберт-образ функції шуму $\hat{s}_{yk}[j]$ (3.10).

3. Визначення фазової характеристики шуму $\Phi[j]$ (3.11).

4. Знаходять різницю фазових характеристик як дискретну функцію $\varphi[j]$ (передбачається, що в подальших експериментах матимемо донні імпульси з частотою сигналу-носія $f = 5$ МГц).

5. Проводиться ряд дослідів з визначення статистики r (3.15) за різних апертур ковзного вікна M_r . Значення апертур задавались з інтервалу $[20 \dots 150]$.

6. Для кожної з отриманих вибірок $(r[j, M_r], j = \overline{1, J}, M_r = \text{const})$ обраховується середнє значення статистики \bar{r} та дисперсія σ_r . Оскільки статистика r розподілена на прямій ($r \in (0,1]$) ці значення отримують за загальновідомими формулами:

$$\bar{r}[M_r] = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J r[j, M_r], \quad (3.24)$$

$$\sigma_r[M_r] = \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (r[j, M_r] - \bar{r}[M_r])^2}, \quad (3.25)$$

Графіки отриманих дискретних функцій $r[M_r], r[M_r] + \sigma_r[M_r]$ та $r[M_r] - \sigma_r[M_r]$ зображені на рис. 3.9.

З аналізу отриманих графіків видно, що вони мають загальний показниковий характер: зі збільшенням апертури M_r значення цих функцій зменшуються.

Для зменшення ймовірності фальшивих спрацювань фазових виявлячів донних сигналів УЗТ за низьких відношень с/ш слід збільшувати значення M_r .

В роботі [100] аналогічні дослідження з виявлення впливу розміру M_r на шумову складову статистики r для базового методу УЗТ проведені в більш широкому діапазоні зміни M_r – від 10 до 500 точок з кроком 1. З метою підвищення достовірності результатів моделювання оцінювання значень $\bar{r}[M_r]$

та $\sigma_r[M_r]$ відбувалось за вибіркою обсягу 100, тобто на 100 різних реалізаціях шумового сигналу з однаковими параметрами.

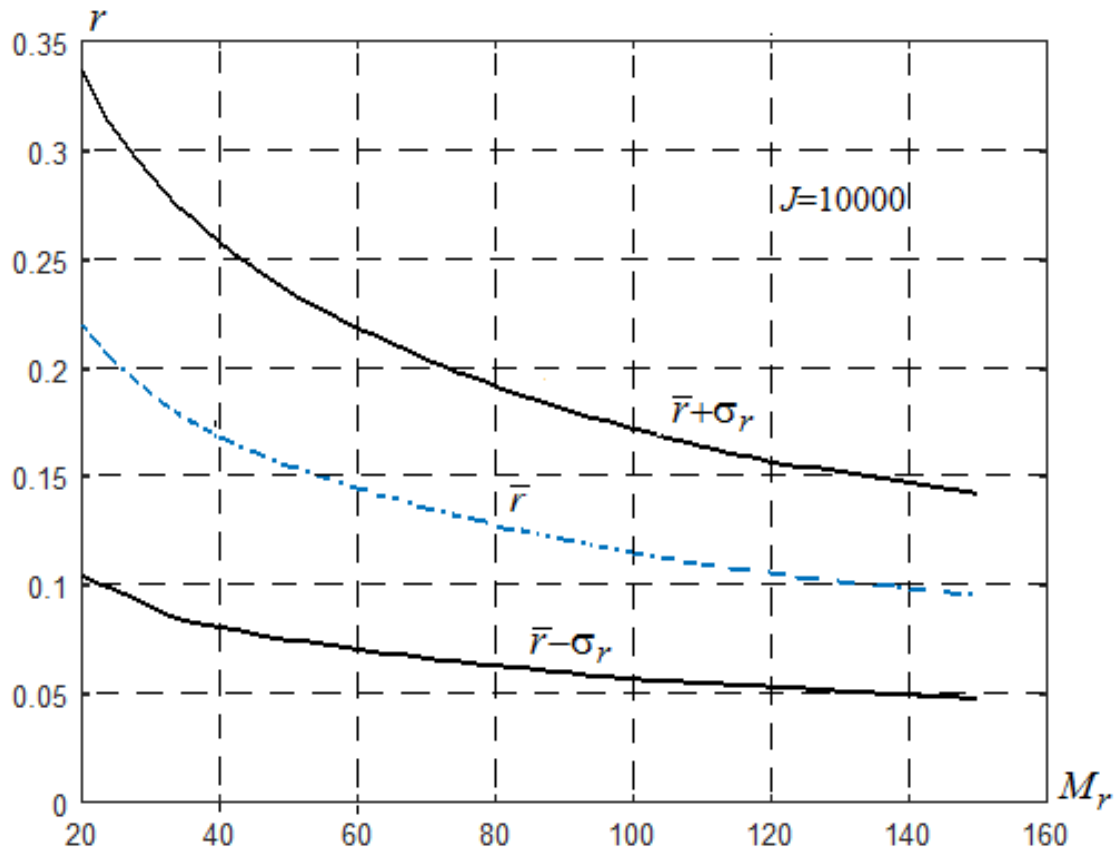


Рис. 3.9. Графіки залежностей $r[M_r]$, $r[M_r] + \sigma_r[M_r]$ та $r[M_r] - \sigma_r[M_r]$

Графіки залежностей оцінок математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення параметру $\tilde{r}[M_r]$ (відповідно $MEAN_{\tilde{r}[M_r]}$ та $STD_{\tilde{r}[M_r]}$) та параметру $\hat{\sigma}_r[M_r]$ (відповідно $MEAN_{\hat{\sigma}_r[M_r]}$ та $STD_{\hat{\sigma}_r[M_r]}$) від апертури ковзного вікна наведені відповідно на рис. 3.10 а,б.

З рис. 3.10 випливає, що у випадку збільшення апертури від 10 до 150 відліків середнє значення статистики r зменшується приблизно від 0,32 до 0,1. Подальше збільшення апертури не приводить до суттєвого зменшення середнього значення статистики r , тому його можна вважати недоцільним.

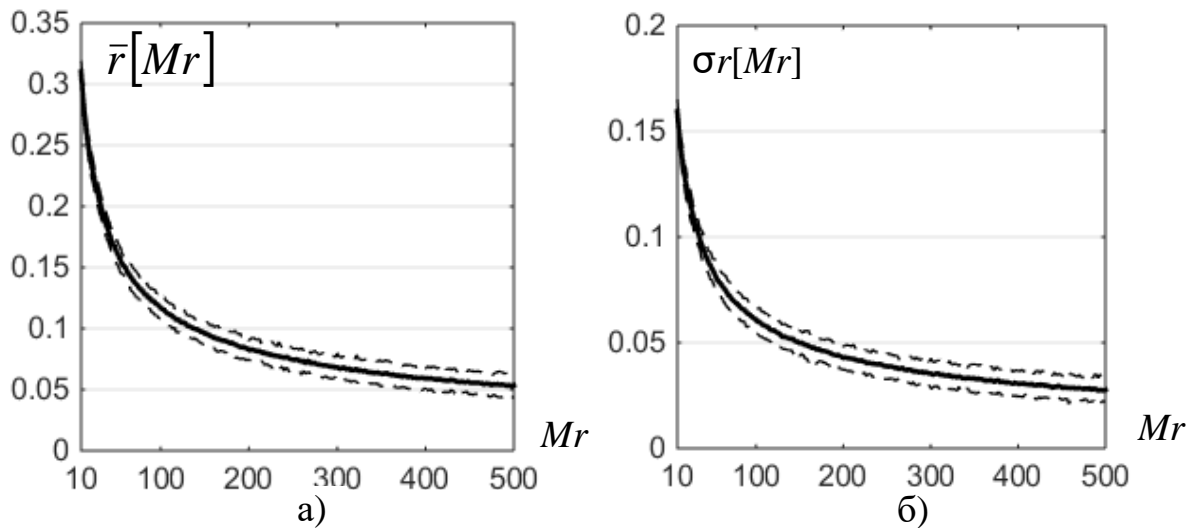


Рис. 3.10. Графіки залежності оцінок параметру $\bar{r}[Mr]$ (а) та оцінок параметру $\hat{\sigma}_r[Mr]$ (б) від апертури ковзного вікна на яких позначено:

$$\begin{aligned} \text{—} & - MEAN_{\bar{r}[Mr]}, & \text{-- --} & - MEAN_{\bar{r}[Mr]} \pm 3STD_{\bar{r}[Mr]} \\ \text{—} & - MEAN_{\hat{\sigma}_r[Mr]}, & \text{-- --} & - MEAN_{\sigma_r[Mr]} \pm 3STD_{\sigma_r[Mr]} \end{aligned}$$

Формування зваженої статистики $r_{зв}$ та її співставний аналіз зі статистикою r . Іншим варіантом вдосконалення базового методу УЗТ є додаткове опрацювання статистики r з множенням її на вагову функцію. Такий спосіб УЗТ запропонований і досліджений в роботах [85, 100, 107]. Вагова функція повинна бути адаптована до статистики r . Його сутність полягає в наступному.

I. До дискретної реалізації сигналу (3.7) $\hat{s}_{ук}[j]$ застосовують базовий метод виявлення сигналів УЗТ та отримують дискретну функцію $r[j]$.

II. Обчислюють поточні значення оцінок $\hat{\sigma}_r[j, M_\sigma]$ як відгук оператора вибіркового середньоквадратичного відхилення на вибірку статистики r обсягу $(2M_\sigma + 1)$ в ковзному режимі, тобто під час руху прямокутного вікна з апертурою $(2M_\sigma + 1)$ відносно вибірки $r[j], j=1 \dots J$. $r[j], j = 1 \dots J$

На кожному j -тому кроці поточне значення оцінки $\hat{\sigma}_r[j, M_\sigma]$ визначається за аналізом вибірки

$$\Theta[k, M_r] = \left\{ r[k], k \in j - \frac{M_\sigma}{2}, j + \frac{M_\sigma}{2}, j \in \frac{M_\sigma}{2}, J - \frac{M_\sigma}{2} \right\}. \quad (3.26)$$

Поточні значення $\hat{\sigma}_r[j, M_\sigma]$ обраховують у відповідності до виразу

$$\hat{\sigma}_r[j, M_\sigma] = \sqrt{\frac{1}{2M_\sigma} \sum_{k=j-\left(\frac{M_\sigma-1}{2}\right)}^{j+\left(\frac{M_\sigma-1}{2}\right)} (r[k] - \bar{r}_j)^2} \quad (3.27)$$

де \bar{r}_j – середнє вибіркове значення статистики r , обчислене за вибіркою (3.26).

III. Визначають поточні значення зваженої статистики r_{3B} за виразом:

$$r_{3B}[j] = r[j] \hat{\sigma}_r[j], \quad (3.28)$$

IV. За зваженою статистикою r_{3B} визначають поріг P (3.18) та центри імпульсів (3.16).

Узагальнена структурно-логічна схема удосконаленого методу УЗТ з використанням вагової функції наведена на рис. 3.11.

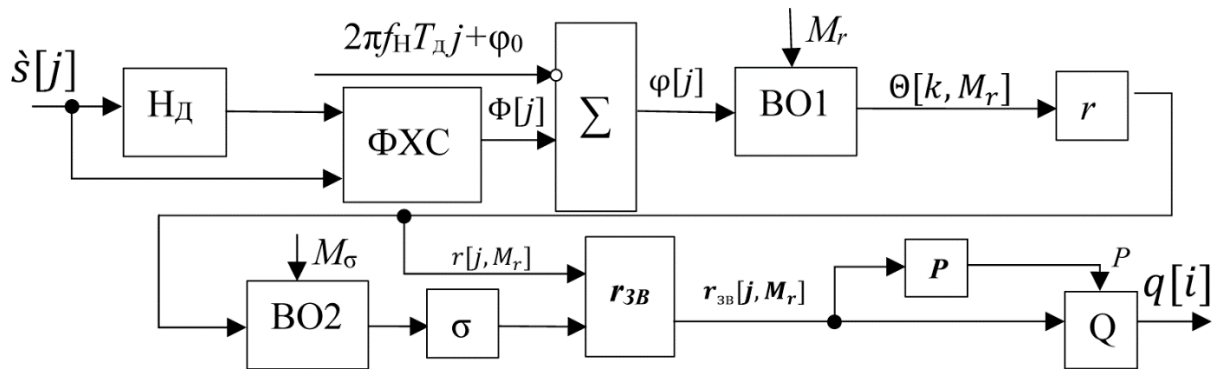


Рис. 3.11. Структурно-логічна схема опрацювання сигналів УЗТ
на основі зваженого оцінювання r -статистики

Для елементів схеми рис. 3.11 використано такі позначення:

Нд – модуль дискретного перетворення Гільберта,

ФХС – модуль визначення ФХС,

Σ – модуль визначення різниць ФХС $\phi[j]$,

BO1, BO2 – модулі віконного опрацювання вибірок даних,

r – модуль визначення поточних значень статистики r ,

σ – модуль визначення поточних значень вибіркового середньоквадратичного відхилення статистики r ,

$r_{зв}$ – модуль визначення зваженої статистики r ,

P – модуль визначення P ,

Q – модуль прийняття рішення про наявність радіоімпульсу та визначення його центру $q[i]$.

Комп'ютерні експерименти з дослідження розглянутого методу УЗТ виконувались на моделі сигналу (3.6) з наступними параметрами: $f = 5$ кГц; $S = 1$ В; $\sigma = 0,5$ В; $\tau_{\text{ИМП}} = 0,6$ мс; $T_a = 16$ мс; $\tau_i = 4$ мс; $k_{\text{ЕАТ},i} = \{ 1, 1/2, 1/3, 1/4 \}$. Отримана вибірка сигналу обсягу $J = 8000$ зображена на рис. 3.12, а (крива 1 – лунаімпульси, крива 2 – адитивна суміш лунаімпульсів та гаусового шуму).

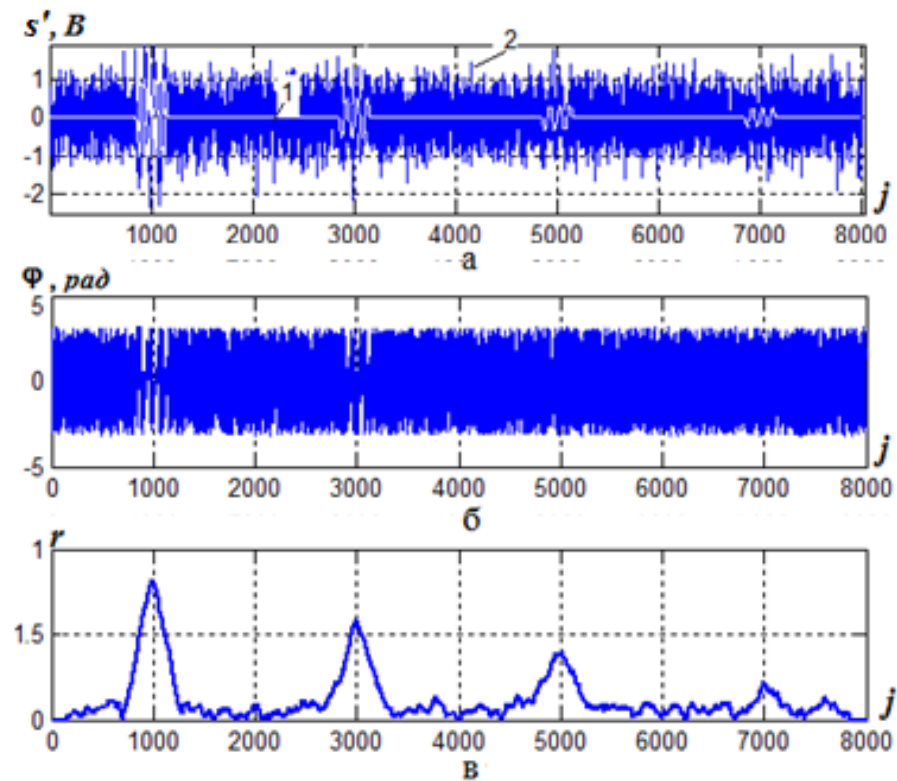


Рис. 3.12. Графіки вибірки досліджуваного сигналу (а),
послідовності $\varphi[j]$ (б), r -статистики (в)

З урахуванням заданих параметрів відношення с/ш для лунаісигналів становить: $c/\text{ш} = \{ 2, 1, 2/3, 0,5 \}$.

За результатом реалізації поданого вище процесу цифрового опрацювання вибірки $s[j], j = \overline{1, 8000}$, отримано послідовності $\varphi[j]$ та $r[j]$, які зображені відповідно на рис. 3.12б, в. В обчисленнях використано вікно з апертурою $M_r = 300$, що відповідає в часі тривалості донного сигналу.

Підвищення відношення с/ш і відповідно підвищення вірогідності виявлення донних сигналів досягається за рахунок додаткового вагового опрацювання послідовності $r[j]$, тобто без збільшення потужності зондуєчого сигналу, часу аналізу чи збільшення кількості вимірювальної інформації. На рис. 3.13 наведено графіки раніше отриманої послідовності $r[j]$ та нової послідовності $r_{3B}[j]$. Остання обчислена за дещо модифікованою формулою (3.28)

$$r_{3B}[j] = r[j] \hat{\sigma}[j] \cdot \left(\frac{j}{400} + 4 \right). \quad (3.29)$$

В обчисленнях використані вікна з апертурою $M_r = 300, M_\sigma = 100$. Введений у вираз (3.29) емпіричний коефіцієнт $\left(\frac{j}{400} + 4 \right)$ не має принципового значення для підвищення відношення с/ш, але дозволяє «вирівняти» амплітуди донних сигналів у двох послідовностях і забезпечити більш наочний і об'єктивний їх співставний аналіз.

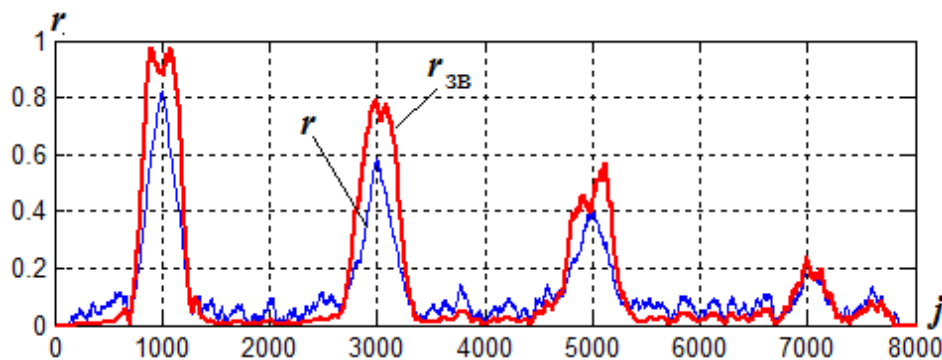


Рис. 3.13. Графік послідовностей $r[j]$ та $r_{3B}[j]$

Наведені на рис. 3.13 графіки свідчать про певне зменшення шумової складової послідовності $r_{3B}[j]$ відносно $r[j]$ і разом з цим незначне збільшення

амплітуд імпульсів та їх розширення в часі. Беручи до уваги той факт, що r_{3B} -статистика є неенергетичним параметром, а рішення про наявність донних сигналів приймається за результатами аналізу його поточних значень, доцільно оцінювати відношення с/ш в послідовностях $r_{3B}[j]$ та $r[j]$ відношенням (3.5). Наприклад, отриманий за такою методикою вираз у відношенні с/ш на виході фазового виявляча в даному експерименті для четвертого лунаїмпульсу за удосконаленим і базовим методами УЗТ становив ~ 2 рази. Цей висновок був підтверджений у серії зі 100 модельних експериментів.

За викладеною вище методикою були проведені модельні експерименти за пониженого значення $(с/ш)_{вх}$ і різних апертур вікна M_r . Результати дослідження відношення $(с/ш)_{вих}$ для базового і удосконаленого методів УЗТ та їх ефективності зведено у таблицю 3.1.

З наведених в табл.3.1 даних та побудованого за цими даними графіку на рис.3.14 видно, щододаткове вагове опрацювання r —статистики дозволяє підвищити відношення сигнал/шум на виході фазового виявляча сигналів УЗТ, що сприяє підвищенню вірогідності їх виявлення в завданнях контролю товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань.

Табл. 3.1. Відношення сигнал-шум до та після обробки за різних відношень с/ш

| Апертура вікна M_r | Відношення $(с/ш)_{вх}$ | Базовий метод УЗТ | | Удосконалений метод УЗТ | | Відносне покращення ефективності, $\frac{E'-E}{E}100, \%$ |
|----------------------|-------------------------|-------------------|------|-------------------------|------|---|
| | | $(с/ш)_{вих}$ | E | $(с/ш)_{вих}$ | E' | |
| 100 | 0,5 | 1,94 | 3,88 | 2,8 | 5,6 | 44 |
| | 0,33 | 1,5 | 4,55 | 1,8 | 5,45 | 20 |
| | 0,25 | 1,25 | 5 | 1,3 | 5,2 | 4 |
| 200 | 0,5 | 2,37 | 4,72 | 4,5 | 9 | 90 |
| | 0,33 | 1,8 | 5,45 | 2,45 | 7,4 | 36 |
| | 0,25 | 1,42 | 7,1 | 1,57 | 6,28 | 11 |
| 300 | 0,5 | 2,46 | 4,92 | 6,75 | 13,5 | 170 |
| | 0,33 | 1,75 | 5,3 | 3,5 | 10,6 | 100 |
| | 0,25 | 1,46 | 5,84 | 2,3 | 9,2 | 58 |

Графік залежності $(с/ш)_{\text{вих}} = F[(с/ш)_{\text{вх}}, M_r]$ наведено на рис. 3.14.

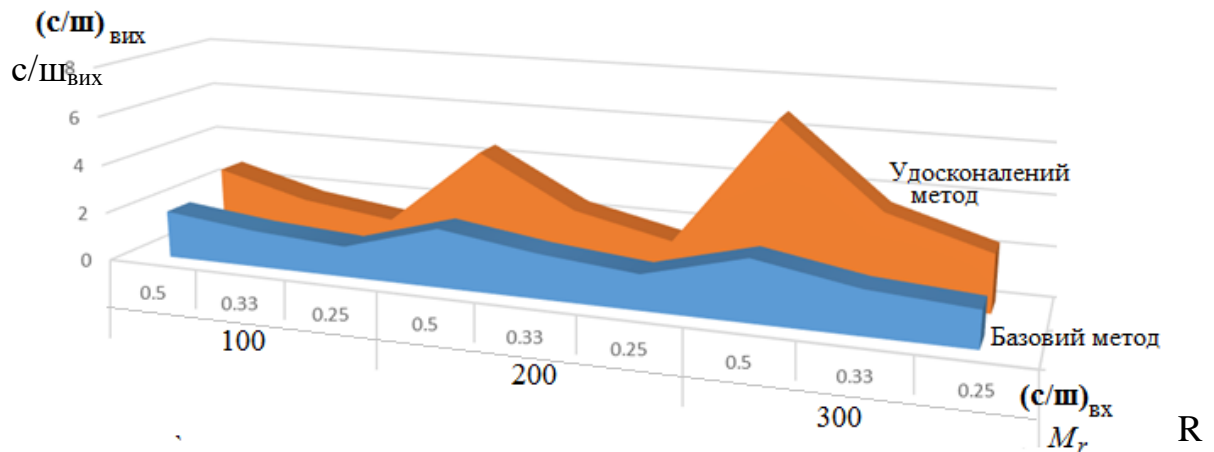


Рис. 3.14. Залежності $(с/ш)_{\text{вих}} = F[(с/ш)_{\text{вх}}, M_r]$ фазових виявлячів луна-сигналів, що реалізують базовий та удосконалений методи УЗТ

Крім того підвищення відношення с/ш дозволяє покращити точність вимірювання товщини виробів ультразвуковим луна-імпульсним методом за рахунок виявлення більшої кількості донних сигналів і можливості статистичного усереднення більших обсягів експериментальних даних [23]. В цьому випадку вимірюванню підлягає часовий інтервал між першим і n -им донними імпульсами за умови їх багаторазового відбиття від поверхонь ОК. В цьому випадку визначають час $\tau_{1,n} = (n - 1)\tau_i$ і знаходять товщину як

$$h = \frac{\tau_{1,n} c_l}{2(n-1)}, \quad (3.30)$$

де $\tau_{1,n}$ – інтервал часу між першим і n -тим донними сигналами.

Така організація процесу вимірювання часових інтервалів дає змогу зменшити середньоквадратичне значення похибки квантування часового інтервалу $\tau = \frac{\tau_{1,n}}{n-1}$ в $\sqrt{n-1}$ разів.

В цілому розглянутий удосконалений метод УЗТ забезпечує підвищену завадостійкість порівняно з розглянутим в р.2 методом, що ґрунтується на використанні фазоманіпульованих сигналів-носіїв, проте має нижчу точність за високого відношення с/ш. Тому під час проведення експериментів за умови зміни коефіцієнтів акустичного тракту для різних матеріалів у широкому

діапазоні значень доцільно використовувати комбінацію цих методів. За значення $c/\text{ш} > 10$ доцільно використовувати метод УЗК з фазоманіпульованим сигналом-носієм, а у випадку $c/\text{ш} < 10$ – метод УЗТ, що ґрунтується на виявленні лунасигналів за зваженою r -статистикою, отриманою за результатами статистичного опрацювання фазової характеристики сигналів УЗТ.

Висновки до розділу

1. Досліджено та удосконалено спосіб лунаїмпульсної УЗТ, який ґрунтується на визначенні часових інтервалів між донними імпульсами за положенням в часі r -статистики, яка визначається за фазовою характеристикою сигналу-носія. Удосконалення методу ґрунтується на аналізі поточних значень зваженої r -статистики. Запропоновано визначати вагову функцію як отриманий в ковзному режимі відгук оператора середньоквадратичного відхилення на r -статистику, тобто відгук оператора, який формується під час руху відносно r -статистики прямокутного вікна з апертурою значно меншою обсягу статистики r .

2. Значення зваженої r -статистики дозволяє впевнено виявляти лунасигнали УЗТ: на ділянках, де лунасигнал присутній, значення r -статистики збільшуються, а за його відсутності зменшуються. Виявлення сигналів реалізується шляхом послідовного подвійного ковзного опрацювання спочатку фазових даних, а потім r -статистики.

3. Удосконалений спосіб лунаїмпульсної УЗТ має підвищену завадостійкість і дає змогу виявляти сигнали УЗТ за відношення сигнал/шум одиниця і менше. Проведені дослідження підтвердили, що граничне значення відношення $c/\text{ш}$ за яких зберігається можливість виявлення донних імпульсів залежить від апертур вікон аналізу даних, співвідношення частоти сигналу і періоду дискретизації і може бути зменшене за рахунок їх раціонального вибору.

4. Дослідження завадостійкості удосконаленого методу УЗТ проводилось на моделі, яка являє собою адитивну суміш послідовності загасаючих донних сигналів УЗТ і реалізації гаусового шуму. Результатами моделювання доведено,

що додаткове вагове опрацювання r -статистики дозволяє підвищити відношення сигнал/шум на виході фазового виявляча сигналів не менше ніж на 40% за відношення сигнал/шум на вході виявляча не менше 0,5.

5. Отримані результати можуть бути використані для розроблення нових ультразвукових лунаїмпульсних товщиномірів з покращеними метрологічними характеристиками. Крім того, його використання сприяє розширенню номенклатурного ряду виробів, що контролюються ультразвуковими методами, підвищенню інформативності та продуктивності вимірювань.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ВИРОБІВ З КОНСТРУКЦІЙНО МІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ

Теоретичні і модельні дослідження, викладені у попередніх розділах довели, що використання методів опрацювання фазових характеристик сигналів дає змогу вирішити задачу виявлення стрибків фазових характеристик луна-сигналів УЗТ, які з'являються внаслідок застосування фазової маніпуляції зондуючого сигналу, та використовувати їх для прецизійного вимірювання часу поширення ультразвукових сигналів в конструкційно міцних матеріалах. В даному розділі наведено результати експериментальних досліджень удосконаленого фазового методу УЗТ.

4.1 Структура засобу, що реалізує розроблені методи лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії

Структурна схема засобу для практичної реалізації розроблених в п.п. 2.2 та 2.3 методів лунаїмпульсної УЗТ, наведена на рис. 4.1.

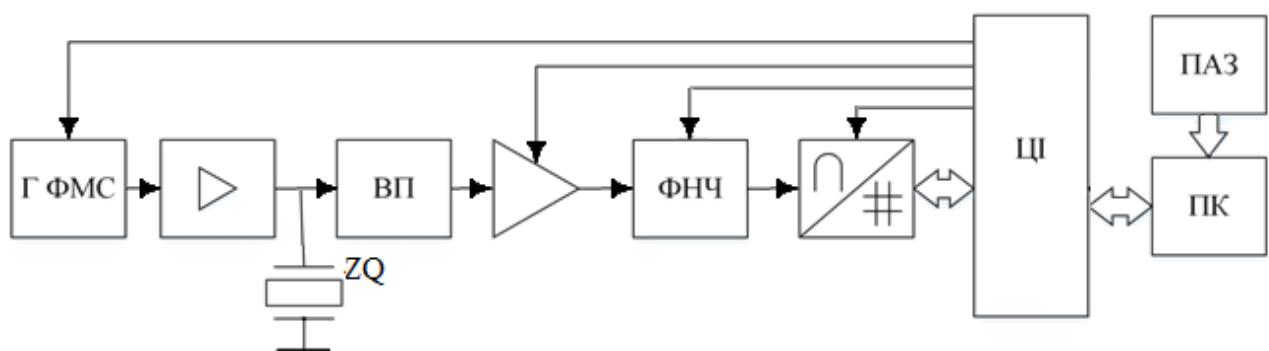


Рис. 4.1. Структурна схем розробленого засобу УЗТ

На цій схемі позначено:

ГФМС – генератор фазоманіпульованих сигналів,

ВП – вхідний пристрій,

ФНЧ – фільтр нижніх частот,

ЦІ – цифровий інтерфейс,

ПК – персональний комп'ютер,

ПАЗ – програмно-алгоритмічне забезпечення.

Схема працює наступним чином. ГФМС формує періодичну послідовність електричних сигналів з фазовою маніпуляцією тривалістю 2 – 6 періодів сигналу-носія. Після підсилення ці сигнали використовуються для збудження ультразвукових коливань у п'єзоелектричному перетворювачі (ПЕП) ZQ. Після поширення цих коливань в ОК і віддзеркалення від його поверхонь ультразвукові лунасигнали перетворюються тим самим перетворювачем ZQ в електричні сигнали, які надходять на ВП. Останній узгоджує п'єзоперетворювач з наступним електронним блоком за опором. Крім того до складу ВП входить схема блокування сигналів з генератора для захисту пристрою під час випромінювання зондуючих імпульсів високої напруги. Далі сигнали підсилюються, фільтруються у ФНЧ та надходять в АЦП. Отримані цифрові сигнали через ЦІ передаються в ПК для подальшого оброблення згідно з ПАЗ. Керування параметрами та режимами роботи структурних складових засобу УЗТ– генератором, підсилювачем, ФНЧ та АЦП, відбувається через ЦІ.

Апаратна частина засобу дає змогу отримати і передати в ПК первинну вимірювальну інформацію у вигляді послідовності миттєвих значень лунасигналів. Структура засобу УЗТ (рис. 4.1), за виключенням генератора ФМ-сигналів, не є оригінальною. Основна відмінність засобу полягає у особливостях вторинного опрацювання вимірювальної інформації, що реалізує розроблені методи лунаїмпульсної УЗТ з використанням ФМ-сигналів і визначає архітектуру програмних засобів та інформаційних потоків.

Структура програмного забезпечення, яка включає модулі керування, інформаційні модулі та програмне забезпечення процесу оброблення експериментальних даних наведена на рис. 4.2. Крім оригінальних модулів вона

включає і ряд таких, що реалізують функції загального управління процесом вимірювання, формування архіву даних і т.і.

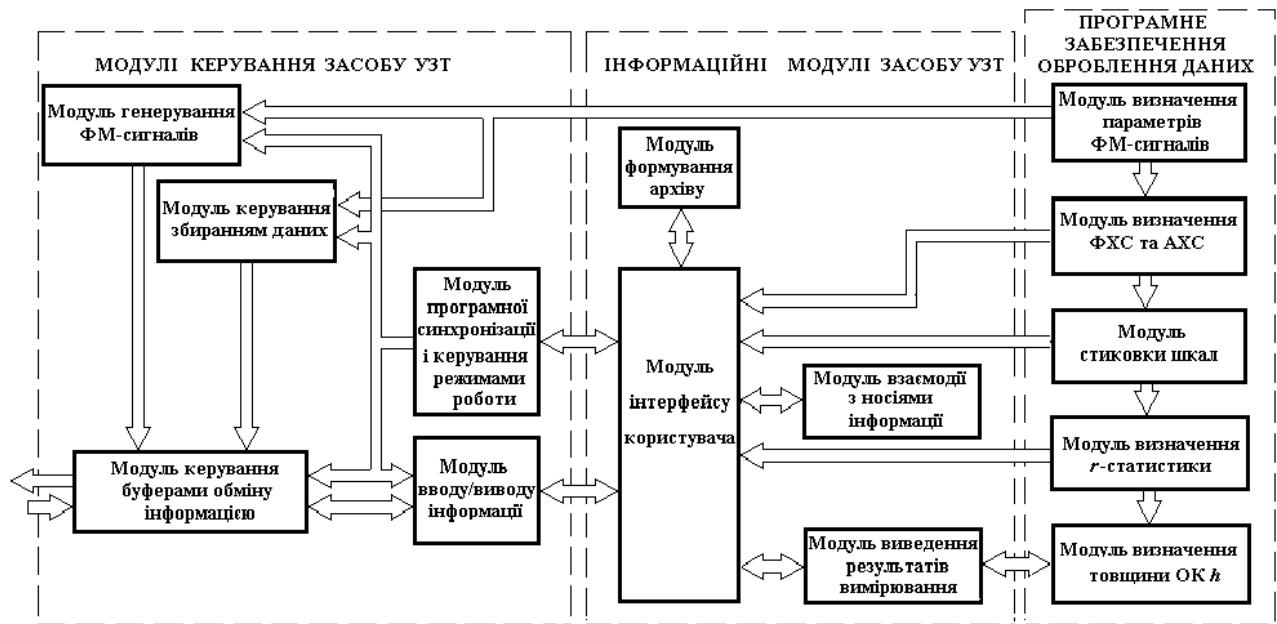


Рис. 4.2. Структура програмного забезпечення та інформаційних потоків засобу лунаімпульсної УЗТ

До модулів керування засобу УЗТ належать наступні:

- модуль генерування ФМ-сигналів – забезпечує керування процесом формування фізичних сигналів збудження ПЕП з фазоманіпульованими сигналами-носіями;
- модуль керування збиранням даних від перетворювача – задає параметри процесу отримання первинної інформації (частота дискретизації, початок і припинення накопичення даних тощо) та параметрів налаштування складових вимірювального каналу (коефіцієнт підсилення сигналу, частота зрізу ФНЧ і т.і.) для кожного циклу вимірювання, який починається з формування зондуючого сигналу;
- модуль програмної синхронізації і керування режимами роботи – узгоджує між собою роботу всіх структурних елементів системи та забезпечує трансляцію даних для управління ними;

- модуль вводу/виводу інформації – забезпечує управління коефіцієнтом підсилення сигналу ПЕП, фільтрацію сигналів, їх аналого-цифрове перетворення та трансляцію в інтерфейс користувача.
- модуль керування буферами обміну інформацією забезпечує рознесену в часі трансляцію даних між складовими засобу.

Інформаційні модулі включають:

- модуль інтерфейсу користувача – забезпечує доступ оператора до органів управління параметрами налаштування товщиноміра, відображення поточного стану параметрів його налаштування, а також проміжних та кінцевих результатів вимірювання, відображення довідникової інформації та інформації з бази даних;
- модуль формування архіву забезпечує формування бази даних за результатами вимірювання та обмін інформацією між цим модулем та інтерфейсом;
- модуль взаємодії з носіями інформації забезпечує в цілому інформаційну підтримку процесу вимірювання шляхом забезпечення доступу до баз даних та обміну інформацією, надання апіорної інформації про ОК, статистичні дані різного характеру тощо;
- модуль виведення результатів контролю забезпечує взаємодію між інтерфейсом користувача та модулем вторинного опрацювання поля діагностичних ознак.

Програмне забезпечення оброблення даних включає:

- модуль визначення параметрів ФМ-сигналів генерації – містить математичне забезпечення для розрахунку миттєвих значень сигналів збудження ПЕП, фіксації частоти сигналів та частоти дискретизації, тривалості та амплітуди сигналів збудження;
- модуль визначення АХС та ФХС забезпечує реалізацію алгоритмів дискретного перетворення Гільберта лунасигналів, цифрової фільтрації, визначення амплітудної та фазової характеристик цих сигналів, різниці

фазових характеристик, виділення інформативних стрибків значень фазової характеристики сигналів та оцінювання за цими стрибками вимірюваних часових інтервалів;

- модуль стиковки шкал забезпечує визначення часових інтервалів між лунасигналами у разі застосування двошкального методу вимірювання τ ;
- модуль визначення r -статистики призначений для використання у разі низького відношення с/ш і забезпечує обчислення r -статистики як функції $r[j]$, що має імпульсну форму, визначення центрів імпульсів, які відповідають центрам лунасигналів і оцінювання за останніми часових інтервалів між лунасигналами;
- модуль визначення товщини ОК h обчислює, з урахуванням швидкості ультразвукових коливань, товщину ОК та формує результат вимірювання.

Запропонована структура програмного та математичного забезпечення засобу реалізує методологію опрацювання сигналів УЗТ, основою якої є використання дискретного перетворення Гільберта у поєднанні з детермінованими та статистичними методами опрацювання характеристик інформаційних сигналів. Це дозволяє виконувати прецизійне оцінювання часу затримки лунасигналів під час прозвучування ОК і в цілому – товщини ОК.

Поєднання можливостей ультразвукового контролю, можливостей методів цифрового опрацювання сигналів та сучасних інформаційно-вимірювальних технологій в рамках запропонованого засобу УЗТ дозволяє підвищити його надійність та точність вимірювання товщини ОК в широкому діапазоні змін фізико-механічних властивостей їх матеріалів.

В загальному плані програмне та математичне забезпечення є важливим інформаційним ресурсом розвитку систем НК, за рахунок удосконалення і доповнення якого можуть підвищуватись метрологічні характеристики засобу вимірювання.

4.2 Експериментальні дослідження процесу поширення фазоманіпульованого сигналу в електроакустичному тракті ультразвукового товщиноміра

Експериментальні дослідження виконувались з метою підтвердження неспотвореної передачі стрибка фазової характеристики зондуючого сигналу в електроакустичному тракті УЗТ [82, 108].

Експериментальні дослідження проводились за наступних умов.

1. Для вимірювання товщини використовуються поздовжні хвилі.
2. Частота сигналу-носія становить 5,0 МГц. Тривалість зондуючого радіоімпульсу – 4 періоди сигналу-носія.
3. Товщина ОК задовольняє умову: затримка ультразвукового сигналу в ОК набагато більша за тривалість зондуючого імпульсу, що необхідно для унеможливлення накладань зондуючого та донного сигналів.
4. Матеріал ОК не має дисперсії швидкості ультразвуку.

Для проведення експериментальних досліджень було створено вимірювальну установку, яка дозволила провести випробування, отримати експериментальні данні і перевірити на експериментальних даних розроблений та удосконалений амплітудно-фазові методи УЗТ. Структура експериментальної установки наведена на рис. 4.3.

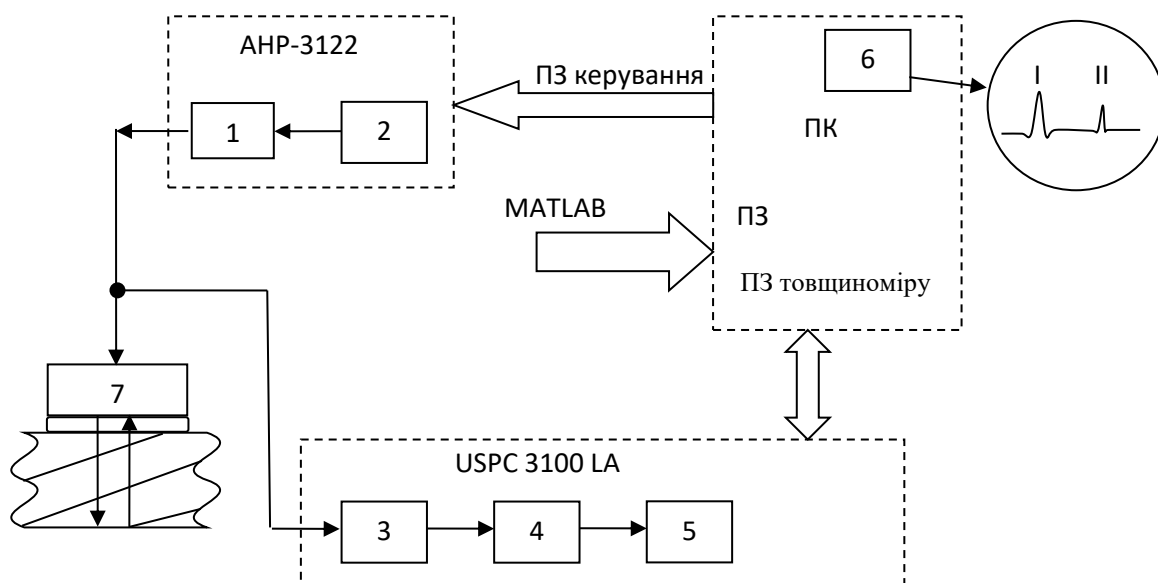


Рис. 4.3 Структура експериментальної установки:

- 1 – генератор зондуючих імпульсів (ГЗІ); 2 – формувач ФМ-сигналів форми;
 3 – вхідний пристрій; 4 – підсилювач; 5 – АЦП; 6 – монітор;
 7 – ПЕП суміщеного типу.

Загальний вигляд експериментальної установки зображений на рис. 4.4 а, а вигляд використаних під час проведення експериментальних досліджень ПЕП – на рис. 4.4 б. Основні технічні характеристики складових експериментальної установки наведено нижче.



а)



б)

Рис. 4.4 Загальний вид стану (а) та п'єзоелектричних перетворювачів (б)

Для формування та генерації сигналу використовувався генератор сигналів довільної (заданої програмно) форми АНР-3122 виробництва компанії «Актаком» (Російська Федерація). Керування генератором здійснювалося за допомогою ПК. Основні характеристики генератора:

- розрядність цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) – 12 біт;
- смуга частот генерованих сигналів 0,02 Гц – 10 МГц;
- максимальна кількість точок на канал – 131 000;

- максимальна частота дискретизації сигналу – 80 МГц;
- тривалість фронту прямокутного сигналу – 20 нс;
- максимальний розмах вихідної напруги ± 10 В за навантаження 50 Ом.

Використовувались два типи перетворювачів суміщеного типу:

1. Panametrics C309 на базі композитної п'єзокераміки (широкосмуговий перетворювач), робоча (центральна) частота 5,0 МГц, діаметр п'єзопластини 12,5 мм.

2. П211-5-П20, на базі звичайної п'єзокераміки (вузькосмуговий перетворювач) робоча частота 5,0 МГц, діаметр п'єзопластини 20,0 мм.

В якості приладу отримання та попереднього оброблення сигналів УЗТ використовувався одноплатний (у вигляді PCI – плати для ПК) одноканальний дефектоскоп типу USPC 3100 LA (виробник – компанія «Socomate», Франція).

Плата дефектоскопу USPC 3100 LA показана на рис. 4.5



Рис. 4.5 Плата USPC 3100 LA у промисловому ПК.

Дефектоскоп виконував функції попереднього підсилення, фільтрації, аналого-цифрового перетворення сигналу УЗТ та їх передавання в ПК зі збереженням отриманої інформації у вигляді файлу даних.

Основні технічні параметри дефектоскопу USPC 3100 LA:

- смуга частот вхідних сигналів дефектоскопу 0,5–20,0 МГц;
- максимальний динамічний діапазон амплітуди сигналу 105 дБ;
- частота дискретизації АЦП – 100 МГц;
- розрядність АЦП – 10 біт.

Зондуючий сигнал формувався у блоці 2 за допомогою спеціалізованого ПЗ, як фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал виду (2.5) з наступними характеристиками: амплітуда сигналу $U=5\text{В}$; частота сигналу-носія $f=5,0\text{ МГц}$; момент маніпуляції фази $\tau_1=0,4\text{ мкс}$; тривалість радіоімпульсу $\tau_i=0,8\text{ мкс}$, період повторення радіоімпульсів $T_{\Pi}=1000\text{ Гц}$.

ПЕП встановлювався на ОК, в якості якого використовувався калібрувальний зразок СО-ЗР, який пройшов метрологічну перевірку і визнаний таким, що відповідає вимогам ГОСТ 1857685. За свідоцтвом про перевірку затримка поширення ультразвукового сигналу в СО-ЗР становить $\tau_{\text{ОК}}=19,94\text{ мкс}$, швидкість поширення ультразвуку – $v=5913,9\text{ м/с}$. На рис. 4.6 зображено креслення стандартного сталевго зразка СО-ЗР.

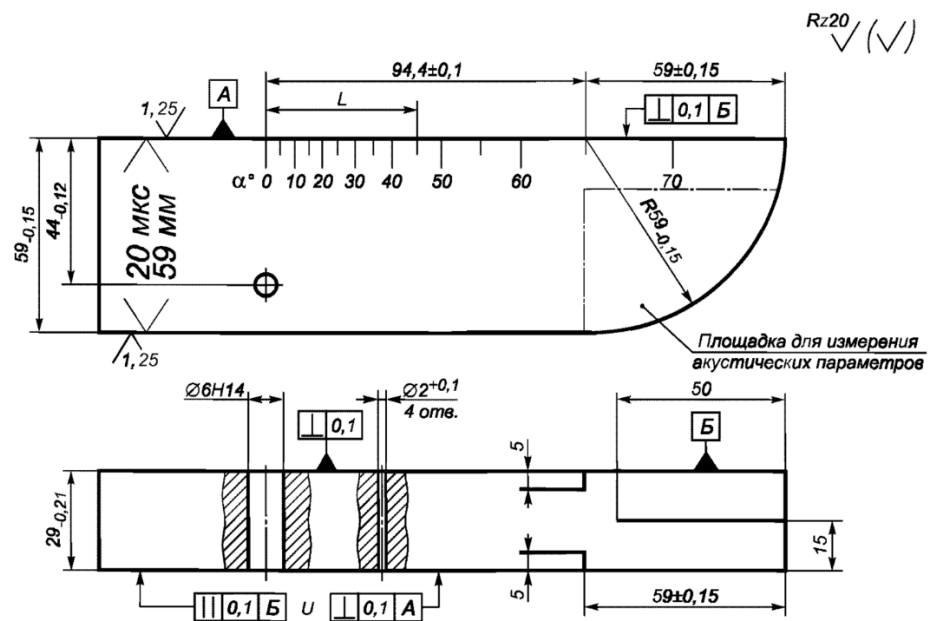


Рис. 4.6 Креслення СО-ЗР.

Свідоцтво про перевірку калібрувального зразка наведено у Додатку Д.

В табл. 4.1 наведені основні акустичні властивості матеріалу, з якого виготовлено зразок [14], що використовувався під час експериментальних досліджень.

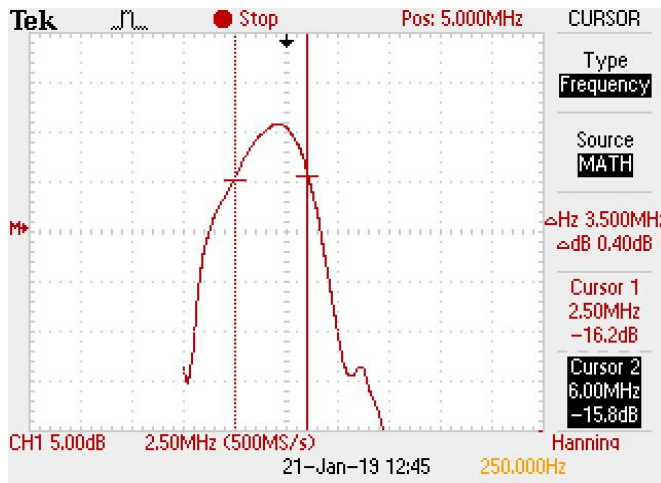
Таблиця 4.1

Акустичні властивості матеріалів експериментального зразка

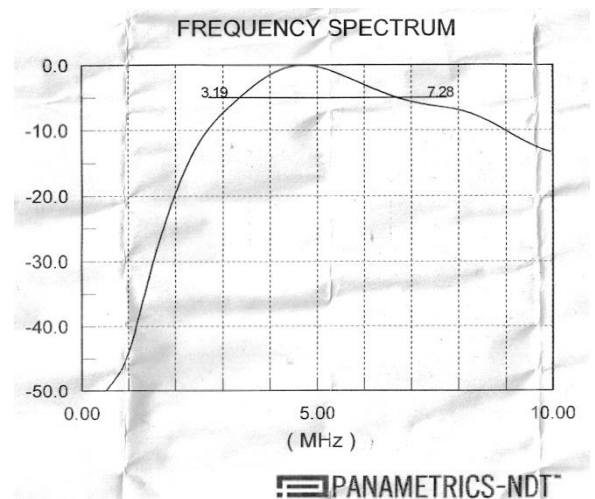
| Акустичні властивості | Значення |
|---|------------|
| Товщина зразка h , мм | 59 |
| Густина ρ 10^3 кг/м ³ | 7,850 |
| Швидкість ультразвукової поздовжньої хвилі C_l , 10^3 м/с | 5,9139 |
| Модуль Юнга $E^{Ю}$, ГПа | 210 |
| Коефіцієнт Пуассона | 0,28 |
| Час поширення сигналу в еталонному зразку τ_E , мкс | 19,94±0,02 |
| Коефіцієнт загасання на частоті 2,5 МГц α , Нп/м | 1,7 |
| Хвильовий опір Z , 10^6 Па·с/м | 46,5 |

Сигнал $u(t)$ за допомогою генератора 1 подавався на суміщений п'єзоелектричний перетворювач 7 та вводився в ОК. Прийнятий після поширення в ОК ультразвуковий сигнал перетворювався тим самим перетворювачем в електричний сигнал і поступав на приймач 3 дефектоскопу, потім підсилювався (підсилювач 4) та надходив на АЦП 5. Дефектоскоп формував вибірки зонduючого і відбитого сигналів з частотою дискретизації $f_d = 100$ МГц передавав їх для аналізу та подальшого опрацювання в ПК у відповідності до програмного забезпечення MATLAB.

На першому етапі випробувань було проведено дослідження амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) широкосмугового перетворювача типу Panametrics C309 за допомогою цифрового осцилографа типу Tektronix TDS 2002C. Отримана експериментальна характеристика (рис. 4.7 а) була порівняна з паспортною (рис. 4.7 б). З отриманих графіків видно, що смуга пропускання за рівнем -6дБ для перетворювача Panametrics C309 становить $\Delta f \sim 4$ МГц (від 3,19 МГц до 7,28 МГц), відповідно добротність перетворювача оцінюється величиною $Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{5}{4} = 1,25$.



а)



б)

Рис. 4.7 АЧХ перетворювача Panametrics C309: виміряна (а) та паспортна (б)

Результати опрацювання експериментальних даних, отриманих на експериментальній установці з використанням перетворювача Panametrics C309 зображено на рис. 4.8.

Оброблення вимірюваного сигналу $u(t)$ виконувалось на інтервалі часу тривалістю 60 мкс (від 10 мкс до 70 мкс), який включав послідовність лунасигналів з першого по четвертий (див. рис. 4.8 а), за розробленою і відпрацьованою на етапі моделювання методикою (р.2.2, п.п. 3 – 7). На рис. 4.8 зображено:

епюра б – графік розрахованої розгорнутої характеристики лунасигналу $\tilde{\Phi}(t)$;

епюра в – графік похідної $\tilde{\Phi}'(t)/dt$ та стробів прямокутної форми, які забезпечують селекцію інформативних стрибків значень ФХС;

епюра г – графік обвідної $A(t)$ лунасигналу, за якою формуються строби;

епюра д – графік виділених ділянок похідної ФХС $\tilde{\Phi}'(t)/dt$ з інформативними стрибками її значень, за якими здійснюється визначення часового інтервалу τ ;

З отриманих графіків видно, що у випадку використання в ультразвуковому товщиномірі широкосмугового ПЕП:

- 1) стрибки значень ФХС фазоманіпульованого зонduючого радіосигналу обмеженої тривалості передаються через ЕАТ товщиноміра і надійно фіксуються наявними апаратними засобами;
- 2) положення стрибків ФХС аналізованого сигналу відповідають затримці на поширення луна-сигналів в ОК, що дозволяє оцінити час затримки з високою точністю.

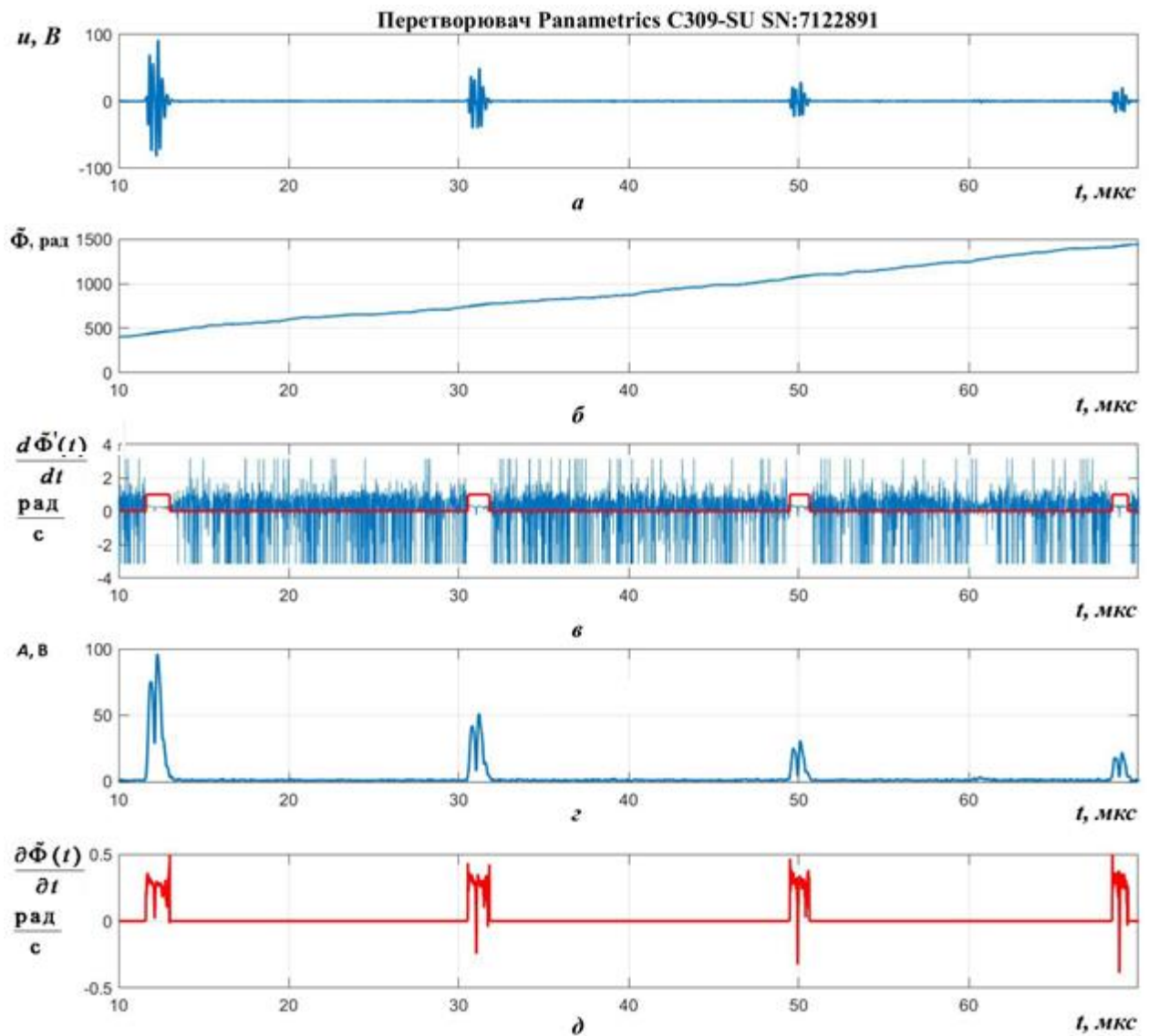


Рис. 4.8 Графіки експериментального сигналу та його характеристик у випадку використання перетворювача Panametrics C309.

Для встановлення точності вимірювання τ_3 було проведене визначення часу затримки поширення вимірюваного сигналу в ОК між першим і другим, другим і третім та третім і четвертим донними сигналами: τ_{1-2} , τ_{2-3} , τ_{3-4} . У проведеній серії з 20 вимірювань отримано такі усереднені значення затримки:

$$\tau_{1-2} = 19,95 \text{ мкс}, \tau_{2-3} = 19,94 \text{ мкс}, \tau_{3-4} = 19,96 \text{ мкс}.$$

Для кожного отриманого результату абсолютна похибка вимірювання становила:

$$\Delta t_{1-2} = \tau_{1-2} - \tau_{\text{ОК}} = 0,01 \text{ мкс}; \quad \Delta t_{2-3} = \tau_{2-3} - \tau_{\text{ОК}} = 0;$$

$$\Delta t_{3-4} = \tau_{3-4} - \tau_{\text{ОК}} = 0,02 \text{ мкс},$$

що відповідає двом періодам дискретизації АЦП дефектоскопа.

4.3 Експериментальні дослідження можливості використання вузькосмугових перетворювачів для передачі фазоманіпульованих сигналів

Основна мета проведеного дослідження – експериментальне підтвердження можливості використання вузько смугових ПЕП для передавання фазоманіпульованих сигналів зі збереженням стрибка фазової характеристики лунасигналів.

Для досліджень з числа наявних обрано стандартний перетворювача типу П211-5-П20, для якого спочатку визначалась АЧХ. Дослідження, як і в п.4.2, виконувалось за допомогою цифрового осцилографа TDS 2002C.

Отримані АЧХ перетворювача показані на рис. 4.9.

В проведеному досліді смуга пропускання за рівнем -6дБ для перетворювача П211-5-П20 становить $\Delta f \sim 1,7$ МГц (від 4,2 МГц до 5,9 МГц), відповідно добротність перетворювача оцінюється величиною $Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{5}{1,7} = 2,9$, тобто більше ніж в 2,3 рази вищою за добротність перетворювача Panametrics C309.

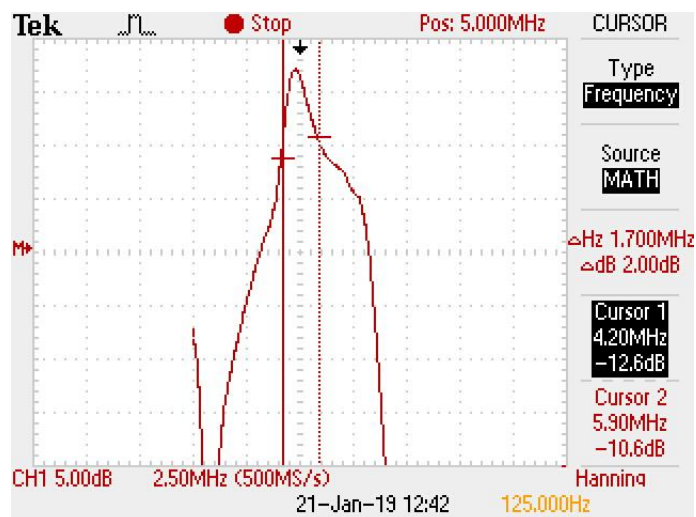
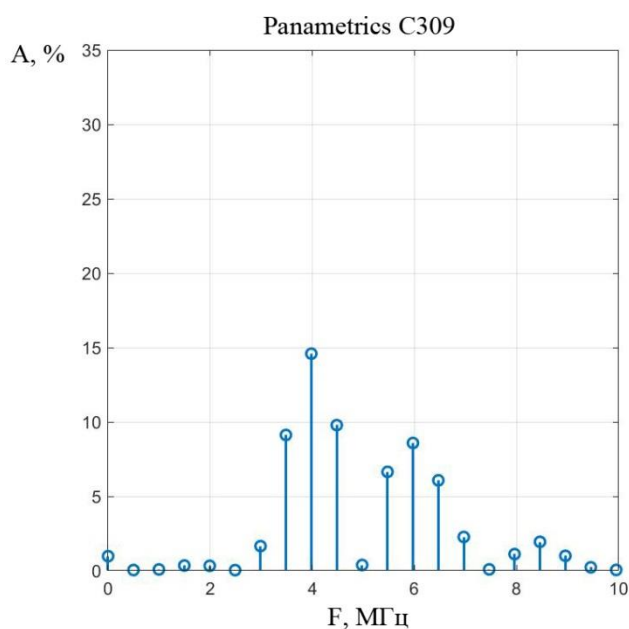
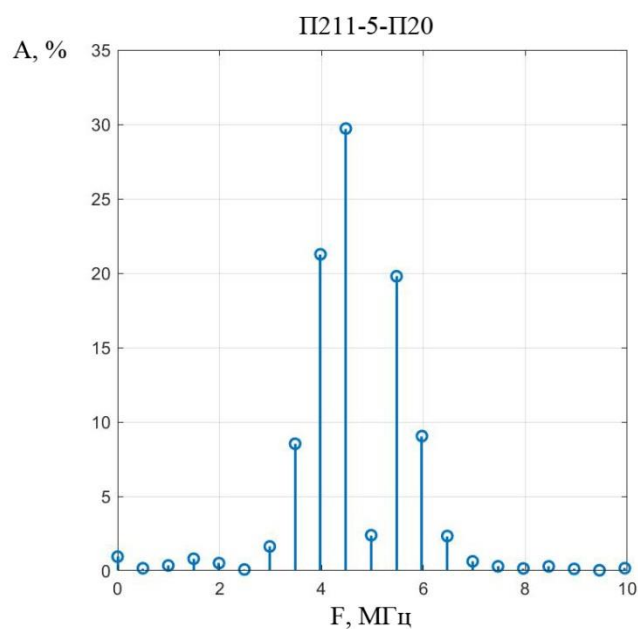


Рис. 4.9 АЧХ вузько смугового перетворювача П211-5-П20

Додатково було проведено аналіз спектрів отриманих луна-сигналів, виконаний за допомогою програмного пакету MATLAB. Спектральні характеристики сигналів перетворювачів Panametrics C309 та П211-5-П20 приведено відповідно на рис. 4.10 а,б .



а



б

Рис. 4.10 Спектри отриманих сигналів з перетворювачів

Panametrics C309 (а) та П211-5-П20 (б)

З графіків видно, що складова основної частоти перетворювача в спектрі сигналів відсутня, що пояснюється наявністю фазової маніпуляції сигналу-носія зі зміною фази на величину π . Крім того енергія сигналу розподілена за спектральними складовими у більш широкій смузі для перетворювача Panametrics C309.

Графіки експериментального лунасигналу, отриманого за допомогою перетворювача П211-5-П20 та результати його опрацювання зображені на рис. 4.11 (найменування епюр аналогічно рис. 4.8).

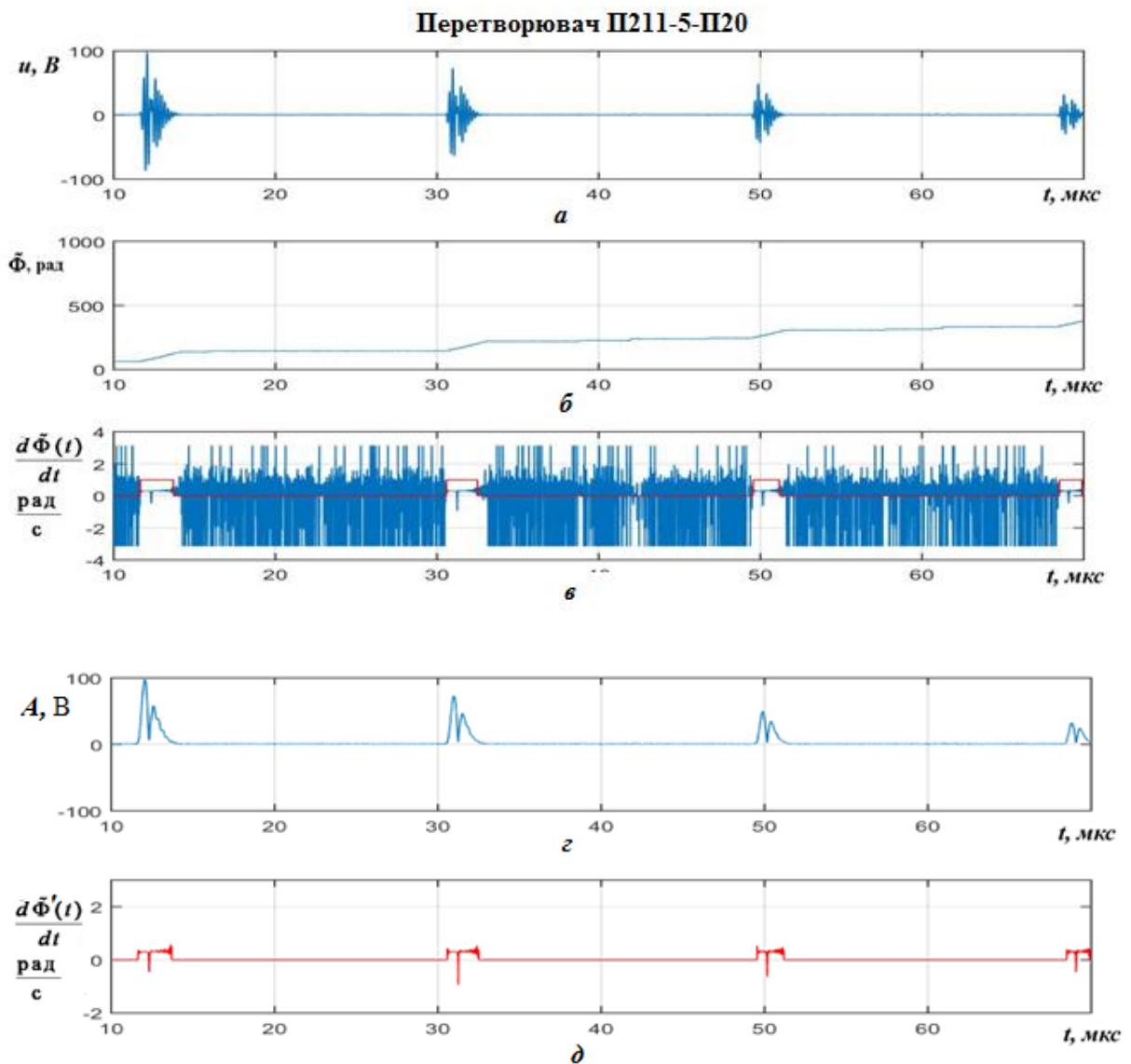


Рис. 4.11 Графіки експериментального сигналу та його характеристик за використання перетворювача П211-5-П20

З отриманих графіків видно, що:

- 1) внаслідок більш високої добротності ПЕП лунаїмпульси мають збільшену за рахунок перехідних процесів тривалість;
- 2) фазоманіпульований зонduючий сигнал поширюється в ЕАТ ультразвукового товщиноміра з таким рівнем спотворень, який дає змогу виявляти стрибки значень ФХС;
- 3) положення стрибків ФХС лунасигналу відповідають затримці на поширення лунасигналів в ОК;
- 4) положення стрибків ФХС лунасигналу відповідають моментам приходу донних радіоімпульсів, що дає змогу оцінити час затримки t_z з високою точністю.

Таким чином, результати досліджень показали, що у випадку використання перетворювачів з вузькою смугою пропускання також існує можливість визначати затримку сигналу в ОК за моментами стрибкоподібної зміни ФХС. При цьому мають місце більші спотворення форми сигналу та похибка ніж при використанні перетворювачів з широкою смугою пропускання, але це суттєво не впливає на виявлення стрибків фазової маніпуляції сигналу-носія. Розкид значень абсолютної похибки вимірювання часових інтервалів, як і у випадку використання більш широкосмугового ПЕП, не перевищував значень $\pm 0,02$ мкс. Незважаючи на те, що атестований стандартний зразок має значно нижчу точність визначення абсолютної затримки, проведений дослід дозволив оцінити вплив зменшення відношення с/ш на похибку визначення затримки, яка вважалась хоч і не точно відомою, але незмінною впродовж експерименту.

В цілому проведені експериментальні дослідження запропонованого способу товщинометрії довели можливість передавання стрибків значень фазової характеристики зонduючого сигналу після його поширення в ЕАТ ультразвукового лунаїмпульсного товщиноміра без суттєвих спотворень та довели можливість його практичного застосування для прецизійного вимірювання часу затримки ультразвукового сигналу.

4.4 Експериментальні дослідження ефективності статистичного опрацювання фазової характеристики сигналу для розв'язання задачі виявлення лунасигналів ультразвукової товщинометрії на фоні значних шумів

Для проведення експериментів використовувалась експериментальна установка, аналогічна описаній в п. 4.2.

Дослідження проводилось наступним чином: в стандартний зразок СО-3Р (параметри зразка див. табл. 4.1) з затримкою поширення ультразвукового сигналу $\tau_{OK} = 19,94$ мкс випромінювався зондуючий ультразвуковий імпульс з гармонічним заповненням. Аналізу піддавався сигнал УЗТ, який являв собою адитивну суміш періодичної (період повтору T_{Π}) послідовності лунасигналів і реалізації гаусового шуму $\xi(t)$, і представляється наступною моделлю [101]:

$$u_d[j] = \sum_{i=1}^I K_{EAT,i} \cdot u_z(jT_d - \tau_1 - (i-1)\tau) + u_{\text{ш}}[j], \quad (4.1)$$

де $K_{EAT,i}$ – коефіцієнти ослаблення ЕАТ для i -того лунаімпульсу, $i = \overline{1, d}$;

τ_1 – затримка першого лунаімпульсу відносно зондуючого сигналу;

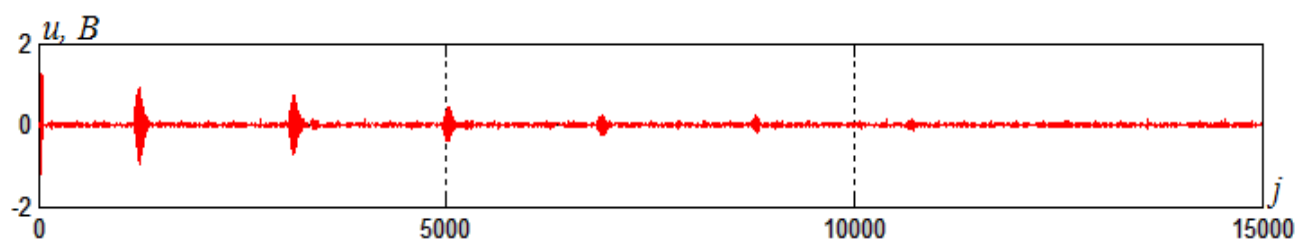
$u_{\text{ш}}[j]$ – реалізація гаусового шуму.

Сигнал виду (4.1) представлений вибіркою $\{u_d[j], j = \overline{1, N}\}$, де N – обсяг вибірки, значення якої отримані в дискретні моменти часу jT_d , jT_d , $j = T_A/T_d$, T_d – період дискретизації.

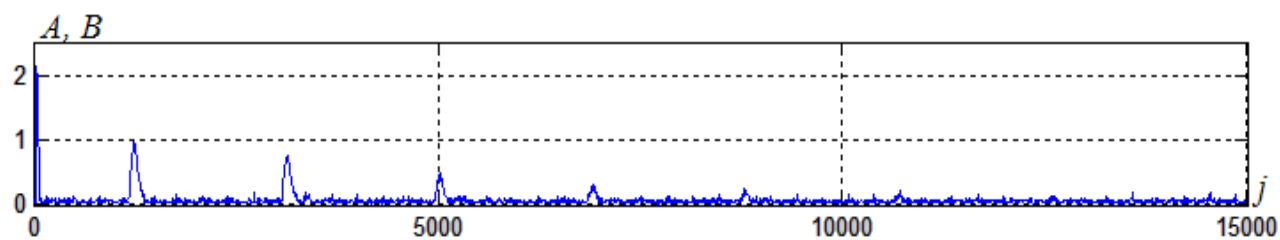
Відношення сигнал/шум для i -того донного імпульсу визначалось величиною $U_{\text{max},i}/\sigma_{\text{ш}}$, де $U_{\text{max},i}$ – максимальне значення обвідної i -того лунасигналу, $\sigma_{\text{ш}}$ – середньоквадратичне значення шуму [103, 113].

Застосовувався зондуючий сигнал з синусоїдним сигналом-носієм частотою 5,0 МГц; частота дискретизації становила 100 МГц. Форма обвідної радіоімпульсного сигналу – прямокутна; тривалість сигналу – 4 періоди сигналу-носія, обсяг вибірки $N=15000$.

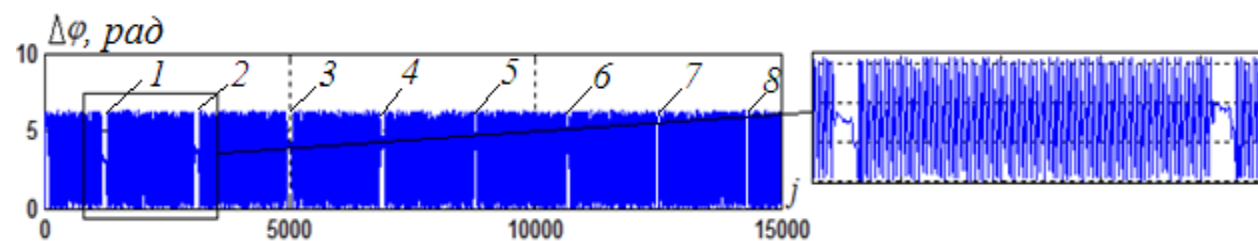
Отримані в ході експерименту дані [110] представлені на рис. 4.12:



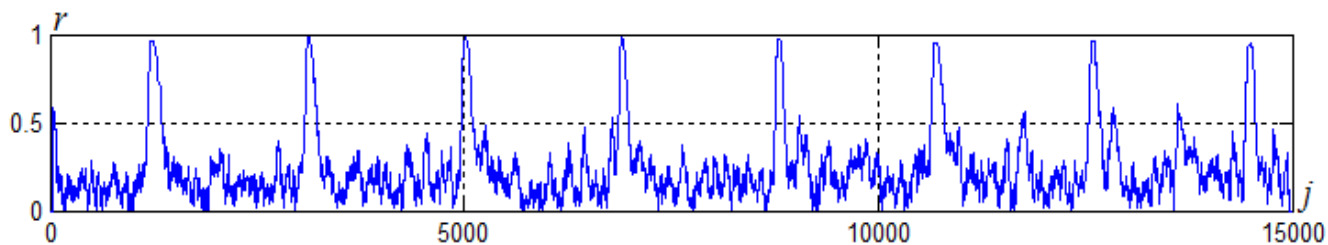
а)



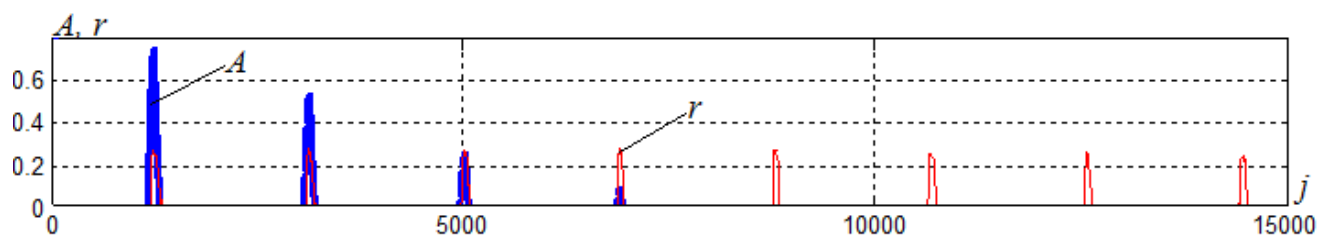
б)



в)



г)



д)

Рис. 4.12 Експериментальні дані

- а) графік отриманого сигналу $u_d[j]$;
- б) графік обвідної сигналу $A[j]$;
- в) фрагмент графіка різниці дискретної ФХС і фази гармонічного сигналу з частотою сигналу-носія;
- г) графік зваженої статистики $r[j, M_r]$ для ковзного вікна з апертурою $M_r = 60$;
- д) фрагмент графіків обвідної $A[j]$ (крива A) та зваженої статистики $r[j, M_r]$ (крива r).

З рис. 4.12 а та б видно, що аналізований сигнал являє собою послідовність лунаїмпульсів в суміші з гаусовим шумом, які загасають за експоненціальним законом. На графіку обвідної впевнено можна вирізнити п'ять лунаісигналів, натомість шостий і всі наступні лунаісигнали маскуються шумом.

Графік різниці дискретної фазової характеристики сигналу УЗТ і дискретних значень фази гармонічного сигналу (рис. 4.12 в) являє собою пилкоподібну функцію, що хаотично змінюється на інтервалі $[0, 2\pi)$ з розподілом, близьким до рівномірного. На інтервалах (див. рис. 4.12 в) ділянок 1 – 8, в межах яких присутні лунаісигнали, графік являє собою криву, яка змінюється в інтервалі, значно меншому за інтервал $[0, 2\pi)$. Це пояснює збільшення зваженої статистики $r[j, M_r]$ на цих ділянках.

Співставний аналіз обвідної і зваженої статистики $r[j, M_r]$ дозволяє зробити висновок про те, що за зменшеного відношення с/ш запропонований метод оброблення сигналів УЗТ на основі статистичного опрацювання їх фазових характеристик є більш ефективним, оскільки забезпечує можливість виявлення більшої кількості лунаїмпульсів, тобто можливість їх виявлення за меншого відношення с/ш. У проведеному експерименті зі зваженою r -статистикою впевнено виявляються вісім лунаїмпульсів ($d=8$). Для восьмого імпульсу відношення с/ш становить $U_{max,i}/\sigma_{ш} \approx 1,8$.

Опрацювання експериментальних даних УЗТ проводилось згідно методики удосконаленого методу, яка викладена у розділі 3.

Додаткові дослідження підтвердили, що граничне значення відношення c/π , за якого зберігається можливість виявлення лунаїмпульсів, залежить від ширини вікна аналізу, співвідношення частоти сигналу і періоду дискретизації і може бути зменшене за рахунок їх раціонального вибору.

4.5 Методика оцінювання невизначеності вимірювання товщини виробів

Концепція невизначеності передбачає оцінку сумарної невизначеності результату вимірювання за бюджетом невизначеності, який складається на основі аналізу діаграми Ішикави [114].

Стисло методика розрахунку невизначеності для лунаїмпульсного методу представлена в роботі [115]. В роботі [116] подано детальний опис методики оцінювання невизначеності результату вимірювання лунаїмпульсним методом УЗТ з урахуванням калібрування, оскільки більшість (приблизно 90%) сучасних товщиномірів мають у своєму складі еталони.

Додатково при оцінюванні невизначеності для розроблених методів лунаїмпульсної УЗТ треба врахувати наступне: оскільки значення часової затримки τ визначається за фазовою маніпуляцією зондуємого сигналу, то на похибку визначення моменту стрибка також впливають величина та крутість ФХС в момент фазової маніпуляції. А також при дослідженні поточних значень зваженої r -статистики треба враховувати вплив відношення c/π .

Методика обчислення невизначеності включала наступні етапи [112]:

1) Розроблення та обґрунтування діаграми впливаючих факторів (діаграми Ішикави). Основні та додаткові впливаючі фактори на цій діаграмі зображені на рис. 4.13.

2) Формування бюджету невизначеності згідно з діаграмою Ішикави.

Для задачі, що розглядається, бюджет невизначеності представлений в таблиці 4.2.

3) Отримання загального виразу для оцінювання комбінованої стандартної невизначеності.

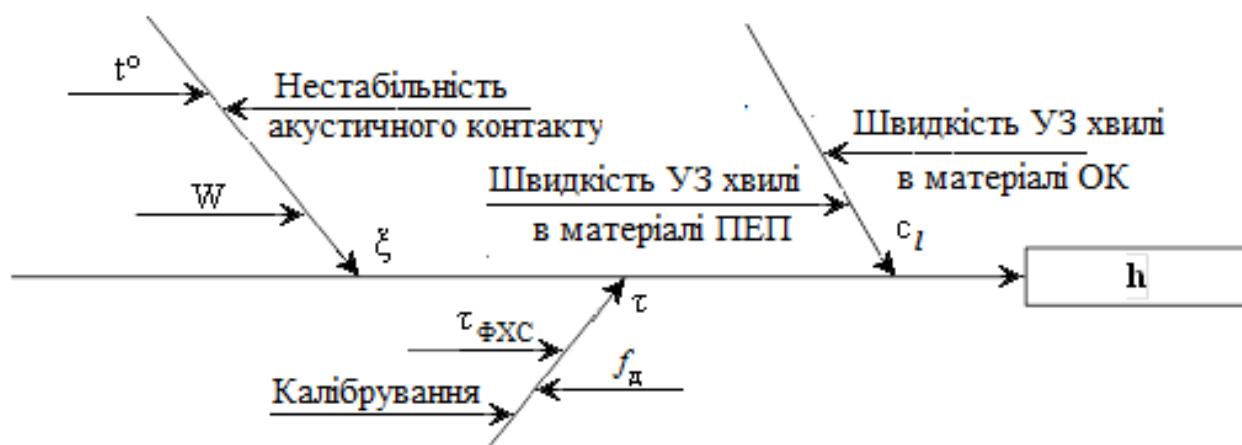


Рис. 4.13 Діаграма Ішикави для випадку вимірювання товщини виробу за стрибками значень ФХС.

Таблиця 4.2

Бюджет невизначеності для оцінювання результату вимірювання товщини

| № п.п | Величина | Впливовий фактор | Тип оцінювання | Закон розподілу | Стандартна невизначеність | Комбінована невизначеність | Коефіцієнт впливу |
|-------|----------|--|----------------|-----------------|---|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1.1 | c | c_1 – швидкість проходження ультразвукової хвилі в товщині матеріалу | В | Рівномірний | $u_{c_1} = \frac{c_B - c_H}{2\sqrt{3}}$ | $u_c^2 = u_{c_1}^2 + u_{c_2}^2$ | $\frac{\tau}{2}$ |
| 1.2 | | c_2 – швидкість ультразвукової хвилі в матеріалі ПЕП | В | Рівномірний | u_{c_2} | | |

Продовження таблиці 4.2.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|--------------------------|--|----------|--------------|---------------------------------------|---|---------------|
| 2.1 | τ | τ_1 – фазовий шум при визначенні значень ФХС | A | Нор-мальний | $u_{\tau_1} = \frac{\sigma_\phi}{S}$ | $u_\tau^2 = u_{\tau_1}^2 + u_{\tau_2}^2 + u_{\tau_3}^2$ | $\frac{c}{2}$ |
| 2.2 | | τ_2 – частота дискретизації f_d | B | Рівно-мірний | $u_{\tau_2} = \frac{1}{f_d \sqrt{6}}$ | | |
| 2.3 | | τ_3 – калібрування | B | Трику-т-ний | $u_{\tau_3} = u_\tau$ зразка | | |
| 3.1 | ξ | ξ_t – температура | B | Рівномірний | $u_{\xi_1} = u_t$ | $u_\xi^2 = u_{\xi_1}^2 + u_{\xi_2}^2 + u_{\xi_3}^2$ | 1 |
| 3.2 | | ξ_W – вологість | B | | u_{ξ_2} | | |
| 3.3 | | $\xi_{\Delta h}$ – нестабільність акустичного контакту | A | | u_{ξ_3} | | |

Під час складання бюджету невизначеності передбачалось, що випадкові складові невизначеності є некорельованими.

Для розглянутого прикладу отримаємо формулу комбінованої невизначеності результату вимірювання товщини виробу:

$$u_h = \sqrt{\left(\frac{c}{2} u_\tau\right)^2 + \left(\frac{\tau}{2} u_c\right)^2 + u_\xi^2}. \quad (4.2)$$

Розглянемо більш детально зазначені вище фактори окремо.

1. Невизначеність, обумовлена неточністю визначення швидкості розповсюдження ультразвукових коливань у матеріалі ОК та ПЕП.

1.1. Складова невизначеності, викликана варіаціями c_1 – швидкості поздовжніх ультразвукової хвилі в матеріалі ОК.

Швидкість поширення поздовжніх хвиль в певному матеріалі залежить від багатьох факторів, зокрема хімічної чистоти матеріалу. Значення швидкості поширення ультразвукових хвиль в різних матеріалах є довідниковими даними.

Вони уточнюються і вносяться у пам'ять вимірювального засобу під час його калібрування.

Якщо відома інформація про нижню c_n та верхню c_v межі швидкості, можна вважати, що швидкість c_1 , як випадкова величина, має рівномірний закон розподілу [117,118]. Отже відповідну невизначеність можна оцінити як:

$$u_{c_1} = \frac{c_v - c_n}{2\sqrt{3}} \quad (4.3)$$

1.2. Складова невизначеності, викликана неточністю значення c_2 – швидкості УЗ хвилі в матеріалі ПЕП. Ця величина є паспортною. Закон розподілу c_2 вважається рівномірним (ця складова похибки враховується у випадку, коли затримка τ визначається між донним та луна-сигналом).

2. Невизначеність, обумовлена значенням часової затримки.

Невизначеність вимірювання часу затримки має три статистично незалежних складових:

2.1. Складова невизначеності, спричинена шумовою складовою сигналу приводить до фазового шуму при визначенні значень ФХС (категорія В) [13]:

$$u_{\tau_1} = \frac{\sigma_\phi}{S}, \quad (4.4)$$

де S – крутість ФХС (рад/с),

σ_ϕ – середньоквадратичне значення фазового шуму.

Закон розподілу цієї складової вважається нормальним, її значення зменшується за рахунок усереднення (категорія А).

2.2. Складова невизначеності, обумовлена частотою дискретизації сигналів в АЦП. Враховуючи рівномірний закон розподілу ймовірності цієї складової похибки, її середньоквадратичне значення визначається як:

$$u_{\tau_2} = \frac{1}{f_d \sqrt{6}}. \quad (4.5)$$

2.3. Складова невизначеності, зумовлена попереднім калібруванням:

$$u_{\tau_3} = u_{\tau \text{ зразка}}. \quad (4.6)$$

Ця складова обумовлена невизначеністю значення τ калібрувального зразка $u_{\tau \text{ зразка}}$. Закон розподілу – трикутний.

З урахуванням некорельованості складових похибки визначення τ , її комбінована стандартна невизначеність представляється наступною формулою:

$$u_{\tau} = \sqrt{u_{\tau_1}^2 + u_{\tau_2}^2 + u_{\tau_3}^2}. \quad (4.7)$$

3. Невизначеність, зумовлена впливом параметрів навколишнього середовища та умов проведення експерименту [112].

Значення ξ обумовлене впливом таких факторів як температура та вологість, недосконалість апаратурної реалізації приладу, неоднорідності матеріалу ОК. Ця складова може бути зменшена за рахунок стабілізації умов проведення експериментальних досліджень з багаторазовим повторюванням вимірювань та їх статистичним опрацюванням.

3.1. Невизначеність, зумовлена зміною температури t навколишнього середовища.

Для оцінювання цієї складової невизначеності необхідно враховувати коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ОК α_{OK} , який є довідниковою величиною. Якщо вимірювання проводяться за нормальних умов в діапазоні температур від t_{\min} до t_{\max} , то

$$u_{\tau} = \frac{(t_{\max} - t_{\min}) \cdot \alpha_{OK} \cdot h}{2\sqrt{3}}. \quad (4.8)$$

3.2. Невизначеність, зумовлена зміною вологості навколишнього середовища.

Вологість може впливати як на властивості ОК (якщо матеріал ОК має властивість гігроскопічності), так і на характеристики вимірювального каналу товщиноміра. У випадку проведення вимірювань за нормальної вологості цією складовою похибки можна знехтувати.

3.3. Невизначеність, зумовлена випадковою зміною акустичного контакту.

Ця складова не має домінуючого значення, аналітично не визначається і враховується на основі проведення багаторазових досліджень. За стабільного акустичного контакту нею можна знехтувати.

Комбінована невизначеність випадкової похибки вимірювання з урахуванням всіх чинників представляється наступним виразом:

$$u_{\xi} = \sqrt{u_{\xi 1}^2 + u_{\xi 2}^2 + u_{\xi 3}^2}. \quad (4.9)$$

Закон розподілу всіх складових випадкової похибки – рівномірний.

Наведені вирази для оцінювання стандартних невизначеностей окремих складових (4.3) – (4.9) достатньо для обчислення комбінованої невизначеності u_h результату вимірювання товщини виробу (4.2).

Інтервальній оцінці невизначеності відповідає розширена невизначеність [113], яку отримують за відомою формулою

$$U = k u_h \quad (4.10)$$

де k – коефіцієнт охоплення.

Значення k визначають як коефіцієнт Стюдента для певного рівня довіри (для технічних застосувань рекомендовано брати рівень довіри 0,95) і ефективного числа ступенів свободи v_{eff} , тому $k = t_{0,95}(v_{eff})$. За наявності складових невизначеності типу А для рівня довіри 0,95 значення v_{eff} обчислюють за формулою Велча-Саттерсвейта [113], яка для розглянутого методу вимірювання визначається як

$$v_{eff} = (n - 1) \left(\frac{u_h}{u_{\tau 1}} \right)^4, \quad (4.11)$$

де n – обсяг масиву значень, за яким виконується усереднення.

Для експериментального підтвердження розробленої методики було проведено дослідження з вимірювання товщини сталюї пластини $h = 10$ мм зі швидкістю поширення ультразвукової хвилі $c \cong 5920$ м/с на частоті $f = 5,0$ МГц. Оцінена за результатами експерименту комбінована

невизначеність результату вимірювання товщини виробу склала $u_h = 0,024$ мм, $v_{eff} = 9$, $t_{0,95}(9) = 2,26$, а розширена невизначеність – $U_h = 0,05$ мм.

Висновки до розділу

1. Розглянуто практичне застосування результатів виконаних теоретичних досліджень з визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів ультразвуковим лунаїмпульсним методом, що ґрунтується на використанні фазоманіпульованих сигналі-носіїв.
2. Експериментально доведена можливість неспотвореної передачі стрибків фазової характеристики зондуючого сигналу після його поширення в електроакустичному тракті ультразвукового товщиноміра.
3. Експериментально доведена можливість застосування для удосконаленого методу УЗТ ультразвукових перетворювачів з вузькою смугою пропускання.
4. Побудовано діаграми Ішикави і проаналізовано основні складові невизначеності, які чинять найбільший вплив на точність вимірювання товщини виробів ультразвуковим лунаїмпульсним методом.
5. Проведене оцінювання точності вимірювання товщини виробів довело, що запропонований метод дає змогу прецизійного вимірювання товщини виробів з різних металевих і неметалевих матеріалів в широкому діапазоні зміни загасання ультразвуку в цих матеріалах.
6. Запропонований метод визначення затримки поширення ультразвукових сигналів може бути використаний для прецизійного вимірювання швидкості ультразвукових коливань у різних досліджуваних матеріалах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення точності засобів лунаїмпульсної УЗТ за рахунок використання фазоманіпульованих сигналів та методів детермінованого та статистичного опрацювання їх фазових характеристик в широкому діапазоні змін акустичних властивостей матеріалів.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Проведені модельні та експериментальні дослідження довели можливість поширення фазоманіпульованих сигналів в електроакустичному тракті ультразвукового лунаїмпульсного товщиноміра і дали змогу обґрунтувати необхідну смугу частот п'єзоелектричних перетворювачів для передавання таких сигналів без втрат інформації про стрибки значень їх фазової характеристики.

2. Розроблено та досліджено теоретично і експериментально амплітудно-фазовий метод лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії, який ґрунтується на використанні зонduючого сигналу з фазовою маніпуляцією сигналу-носія, селекції моментів фазової маніпуляції сигналів за їх амплітудною характеристикою та вимірюванні часових інтервалів за стрибками значень фазової характеристики сигналів, що дало змогу зменшити похибку вимірювання часових інтервалів до періоду сигналу-носія у широкому динамічному діапазоні амплітуд відбитих сигналів.

3. Запропоновано удосконалення амплітудно-фазового методу лунаїмпульсної ультразвукової товщинометрії з використанням ФМ-сигналів за рахунок уточнення отриманої часової затримки лунаісигналів шляхом вимірювання і врахування фазових зсувів сигналу-носія. Такий двошкальний метод вимірювання дає змогу зменшити абсолютну похибку формування і вимірювання часового інтервалу до величини $\pm 0,2$ періоду дискретизації сигналу і не потребує розширення робочої смуги частот товщиноміра.

4. Досліджено та удосконалено метод лунаїмпульсної УЗТ, який ґрунтується на визначенні часових інтервалів між донними імпульсами за положенням в часі r -статистики, яка визначається за фазовою характеристикою сигналу-носія. Удосконалення методу ґрунтується на аналізі поточних значень зваженої r -статистики. Запропоновано визначати вагову функцію як отриманий в ковзному режимі відгук оператора середньоквадратичного відхилення на статистику r . Результатами моделювання доведено, що додаткове вагове опрацювання r -статистики дозволяє підвищити відношення сигнал/шум на виході фазового виявляча сигналів не менше ніж на 40% за відношення сигнал/шум на вході виявляча не менше 0,5, що за рахунок виявлення більшої кількості лунасигналів дає змогу підвищити точність вимірювання часу поширення сигналів у виробі.

5. Розроблено методики визначення товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів для запропонованого і удосконаленого методів лунаїмпульсної УЗТ, що дало змогу створити програмне забезпечення для опрацювання фазоманіпульшованих лунасигналів УЗТ та їх фазових характеристики, а також забезпечило прецизійне вимірювання часу поширення сигналів у виробі в широкому діапазоні змін пружних характеристик матеріалу.

6. Розроблено дослідний зразок засобу лунаїмпульсної УЗТ, який реалізує розроблені методи і забезпечує за рахунок використання тестових фазоманіпульшованих сигналів та фазових методів опрацювання вимірювальної інформації зменшення похибки вимірювання товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів в цілому на 35-40% у випадку опрацювання сигналів з низьким рівнем шуму ($c/\pi \gg 1$) і на 15-20% у випадку зашумлених відбитих сигналів ($c/\pi < 1$).

Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення системи, яке реалізує запропоновані методи лунаїмпульсної УЗТ і може бути використане автономно з метою проведення відповідних комп'ютерних вимірювальних експериментів.

7. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), а також використані у навчальному процесі кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Комп'ютерно-інтегровані системи технічної та медичної діагностики».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Щербинский В.Г. Алёшин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 340 с.
2. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практи. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; Под ред. В.В.Сухорукова – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.: ил.
3. Алешин Н.П., Лупачев В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: Справ. пособие. – Мн.: Высш. шк., 1987. – 271 с.
4. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
5. Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів / В.К. Качанов, О.В. Мозговий, О.І. Пітолін, В.П. Попко, Г.Ю. Рябов: Навч. Посібник / За ред. В.П. Бабака. – К.:ІСДО, 1994. – 132 с.
6. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов: справоч. изд., пер.с.нем./Й. Крауткремер, Г. Крауткремер.–М.: Металлургия, 1991.–752 с.
7. Чуприн В.А. Особенности ультразвуковой толщинометрии промышленных объектов и изделий / В.А.Чуприн, А.Н.Бизюлев, А.А.Коновалов // В мире неразрушающего контроля. – 2008 – №2(40) – с.12 – 14.
8. С.Н. Chen. Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material charracterization /University of Massachusetts, USA World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.– 1-217p
9. Беркута В.Г., Валевиц С.М. Ультразвукова дефектоскопія. Навчальний посібник. – Кіровоград: ТОВ «Імекс – ЛТД», 2006. –177с.
10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Подобщ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
11. Галаган Р.М. Ультразвукова система статистичної діагностики технічного стану порцелянових ізоляторів: дис. кандидата техн. наук : автореф. дис. на

- здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин»/ Р.М. Галаган. – К., 2011. – 20 с.
12. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль. Учебник для специалистов первого и второго уровня квалификации. Издание пятое, стереотипное. – М.: 2006. – 208 с.
 13. Монченко О.В. Фазовий метод ультразвукової товщинометрії виробів з багатошарових матеріалів: дис. кандидата техн. наук: 05.11.13 / Монченко Олена Володимирівна. – К., 2010. – 156 с.
 14. Бистра І. М. Вдосконалення методу і засобу ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням: дис. кандидата техн. наук : 05.11.13 / Бистра Інна Миколаївна. – К., 2014. – 152 с.
 15. Марченко А.В. Вимірювання товщини металевих виробів ЕМА методом з використанням спектральної обробки авто кореляційної функції : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.15 «Метрологія та метрологічне забезпечення»/ А.В. Марченко. – Харків, 2007. – 18 с.
 16. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М. А. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін.; За ред. М. А. Сологуба. – К.: Вища школа, 2002. – 374 с.
 17. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Підручник для студ. вищ. навч. закл. / В. В. Попович, В. В. Попович. — Львів: Світ, 2006. — 624 с.
 18. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: Карманный справочник. /Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Додэка-XX1», 2004. — 320 с, ил. (Серия «Карманный справочник»)
 19. Конструкционные материалы: Справочник / Б.Н. Армазасов, В.А. Бростерм, Н.А. Буше и др.; Подобщ. ред. Б.Н. Армазасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.; ил. – (Основы проектирования машин)
 20. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідник. посіб. / під. заг. ред. В. В. Панасюка. Т.9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та

- елементів конструкцій / О. П. Осташ, В. М. Федірко, В. М. Учанін та ін. / під ред. О. П. Осташа, В. М. Федірка. – Львів: Вид-во «Сполом», 2007.– 1068 с.
21. Писаренко Г.С. Опір матеріалів. Підручник /Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. За ред. Г. С. Писаренка — К.: Вища школа,1993.— 655 с.
 22. Пчелінцев В. О. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів: Навч. посіб. / В. О. Пчелінцев, А. І. Дегула.— Суми: СумДУ, 2012.— 247 с.
 23. Цапенко В.К. Основы ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 448 с.
 24. Конкин А. А., Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы / А. А. Конкин, М.: Химия, 1974.— 376 с.
 25. Сайфулин Р. С. Неорганические композиционные материалы /Р.С. Сайфулин, М.: Химия, 1983. – 304 с.
 26. Справочник по композиционным материалам: В 2 т. Т. 1 / Под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта; под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
 27. Павлов И.В. Композиционные материалы и неразрушающий контроль / И. В. Павлов // В мире неразрушающего контроля : Ежеквартальное журнальное обозрение. – 2003. – № 3. – С. 4–7.
 28. Pileckas E. The measurements possibilities of acoustic damping in composite materials / E. Pileckas // AVIATION – 2004, – Vol VIII. – No 4. – P. 16–20.
 29. Ермолов И.Н. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии: Краткий справочник / И.Н. Ермолов, А.Х. Вopilкин, В.Г. Бадалян. – М.: НПЦ «ЭХО+», 2004, – 110 с.
 30. Воробей В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.
 31. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.— Введен 01.07.1980.— М.: Изд-во стандартов, 1979.—17 с.

32. Сударикова Е. В. Неразрушающий контроль в производстве: учеб. пособие. Ч. 1.; ГУАП. — СПб., 2007. — 137 с.: ил.
33. Сударикова Е. В. Неразрушающий контроль в производстве: учеб. пособие. Ч. 2.; ГУАП. — СПб., 2007. — 112 с.: ил.
34. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учебн. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. — 243 с.
35. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Грав. ред. И.П. Голямина. — М.: «Советская энциклопедия», 1979. — 400 с.
36. Гурович А.К. Толщинометрия изделий и покрытий. Методы и задачи / А.К. Гурович, В.А. Сясько, Б. В. Артемьев, А. Я. Грудский, Ю. К. Федосенко, В. Г. Шевалдыкин //Ежеквартальное журнальное обозрение «В мире неразрушающего контроля». — 2008. — №2 (40). — С. 5.
37. Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры/М.В. Королев. — М.: Машиностроение, 1980. — 111 с.
38. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении / Е. Ф. Кретов // В мире неразрушающего контроля.— 2008. — № 2.— С.26–28.
39. Семеренко А.В. Эхо – метод ультразвуковой толщинометрии // В мире неразрушающего контроля – 2008 – №2(40) – с.6 – 10.
40. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П.Мусяенко, Е.В Шарапова. Под ред. В.М. Шарапова. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
41. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. — М.: Машиностроение, 1986. — 280 с.
42. Доммаркас В.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В.И. Доммаркас, Р-И.Ю. Кажис. — Вильнюс: Минтис, 1975.—255 с.
43. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля: под ред. И.Н. Ермолова. — М.: Машиностроение, 1986.—280 с.
44. Пугачев С.И. Пьезокерамические преобразователи. Расчет и проектирование: справочник /С.И. Пугачев.—Л.: Судостроение, 1984.—256 с.

45. Разыграев Н.П. Исследование технологии ультразвукового контроля толщины ЭМА методом / Н.П. Разыграев, Разыграев А.Н., Пономарёв С.Н., Безлюдько Г.Я., Миховски М., Мирчев Й. // Дефектоскопия. – 2010. - № 6. С.60-80.
46. Королев М.В. Безэталонные УЗ толщиномеры / М.В. Королев. – М.: Машиностроение, 1985. – 109 с.
47. ГОСТ 28702-90. Контроль неразрушающий. Толщиномеры ультразвуковые. Общитехнические требования. – Введ. 01.01.92. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 10 с.
48. ГОСТ 23702-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. – Введ. 01.01.92. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 35 с.
49. ГОСТ 8.495-83. Государственная система обеспечения единства измерений. Толщиномеры ультразвуковые контактные. Методы и средства поверки. – Введ. 01.01.85. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. – 10 с.
50. ГОСТ 22238-76. Контроль неразрушающий. Меры образцовые для поверки толщинометров покрытий. Общие положения. – Введ. 01.01.78. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. – 4 с.
51. Балдев Р. Применение ультразвука / Р. Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами – М.: «Техносфера», 2006. – 576 с.
52. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие для студ. втузов. – 2 изд., перераб. и доп. - М.: Высш.шк., 1989. – 384 с
53. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы: Учебник для вузов / П.П.Орнатский. – К.: Вища школа, 1980. – 560 с.
54. Fowler K. A., Elfbaum G. M., Smith K. A., Nelligan T. J. Theory and application of precision ultrasonic thickness gaging. –NDTnet, 1997. – V. 2. No. 10.
55. Куц Ю.В. Статистична фазометрія. Наукова монографія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 384 с.

56. Патент України на корисну модель № 18441. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини багатошарових матеріалів та виробів / В.С. Єременко, Ю.В. Куц, О.В. Монченко. – Опубл. 26.08.2008, Бюл. №16, 2008.– 4 с.
57. Куц Ю.В. Ультразвуковое измерение толщины многослойных материалов и изделий/ Ю.В. Куц, О.В. Монченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. - №1. С. 35-38.
58. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Застосування перетворення Гільберта у фазометрії // Технологические системы. – 2004. –№2. – с.50 – 55.
59. Бабак В.П. Обробка сигналів у радіоканалах цифрових систем передавання інформації : Навч. посібник / В.П. Бабак, Т.М. Наритник, Ю.В. Куц та ін. /За заг. Ред. Чл.-кор.НАН України В.П. Бабака. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 476 с
60. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк. 1970: Пер. с англ. (в 4-х томах)/ Под общей ред. К.Н. Трофимова; Т.З. Радиолокационные устройства и системы / Подред А.С. Виницкого. – М.: Сов. радио, 1978. – 528 с.
61. Качанов В.К. Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів: Навч. посібник /В.К. Качанов, О.В. Мозговой, О.І. Пітолін та ін./ За ред. В.П. Бабака. –К.: ІСДО,1994. –132 с.
62. Качанов В.К. Особенности применения сложномодулированных сигналов в ультразвуковой дефектоскопии / В.К. Качанов, Соколов И.В. //Дефектоскопия. – 2007. - № 12. С. 18-42.
63. Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. –2008. –№2. – С. 31 – 35.

64. Патент України на корисну модель № 35057. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, В.С. Єременко, О.В. Монченко, І.М. Лапіга. – Опубл. 26.08.2008, Бюл. №16, 2008.
65. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. – М.: Гл.ред. физ.-мат. Литературы изд-ва «Наука», 1979. – 240с.
66. Fisher N.I. Statistical analysis of circular data. / N.I. Fisher. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 277 p.
67. Jammalamadaka S. Rao. Topics in circular statistics / S. RaoJammalamadaka, A. SenGupta. – Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001 – 322p.
68. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2003.– 104 с.
69. Карташев В. Г. Оптимальное выделение сигналов на фоне структурного шума в УЗ дефектоскопии / В. Г. Карташев, В. К. Качанов // Дефектоскопия, 1992. – №7. – С. 14-24.
70. Дідковський В.С. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання): навч. посіб. / В.С. Дідковський, О.Г. Лейко, В.Г. Савін. – Кіровоград: «Імекс ЛТД», 2006.– 448 с.
71. Ультразвуковые преобразователи / Под ред. Е. Кикучи; пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 424 с.
72. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. /И.С. Гоноровский – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.
73. Баскаков С И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник /С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1983. – 536 с.
74. Королев М.В. Широкополосные ультразвуковые преобразователи / М.В. Королев, А.Е. Карпельсон. – М.: Машиностроение, 1982. – 157 с.
75. Julius S. Bendat Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition / Julius S. Bendat, Allan G. Piersol. – Hoboken: John Wiley&Sons, Inc., 2011. – 640 p

76. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс: Второе изд. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.
77. Lawrence Marple, Jr. Computing the Discrete-Time "Analytic" Signal via FFT / S. Lawrence Marple, Jr. // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1999. – Vol. 47, №9. – P.2600–2603.
78. Куц Ю.В. Методи та системи статистичної фазометрії: Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.16 – інформаційно-вимірювальні системи. – Національний авіаційний університет, Київ, 2004.
79. Пат. 79972 Україна, МПК G01B17/02. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.В. Куц, В.Л. Найда, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201212606; заявл. 05.11.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. №9. – 4с.
80. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – Київ, 2013. – № 1. – С. 23-27.
81. Олійник Ю.А. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.К. Цапенко // II Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2012. – С.101.
82. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник // III Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2013. – С.154-156.
83. Олійник Ю.А. Прецизійне вимірювання товщини фазовим способом ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.В. Левківська, О.В. Монченко // VII Міжнар. науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси». Збірник тез доповідей / НАУ. – Київ, 2014. – С. 94.

84. Олійник Ю.А. Використання фазоманіпульованих сигналів для підвищення точності вимірювання товщини виробів з композиційних матеріалів / Ю.А. Олійник, Б.В. Добржанська, О.В.Монченко // III Міжнар. Наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». Збірник тез доповідей / ВНТУ. – Вінниця, 2015. – С.32.
85. Монченко О.В. Розробка методів оброблення фазової характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії з підвищеною достовірністю / О.В. Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник, Р.О. Ткачик // X Міжнар. науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей / ІнститутМетрології. – Харків, 2016. – С.25.
86. Олійник Ю.А. Фазовый способ ультразвуковой толщинометрии / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, Ю.В. Куц, В.Ю. Куц, // Ж-л «Научни известия на НТСМ». – Созополь, Болгария, 2013. – № 2(139). – С.57-61. (Входитьдо The Web's Largest Open Access Database of NTD, Google Scholar).
87. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB : учеб.курс / Ю. Лазарев. – СПб. : Питер; К. : Изд. группа BHV, 2005. – 512 с.
88. ДьяконовВ.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
89. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1983. – 455 с.
90. Кинкулькин И.Е. Фазовый метод определения координат / И. Кинкулькин, В. Рубцов, М. Фабрик. – М.: Советское, 1979. – 280 с.
91. Михеечев В.В. Геодезические светодальномеры / В.В.Михеечев. – М.: Недра, 1979. – 222 с.
92. Маевский С.М. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояни / С. Маевский, В. Баженов, Е. Батуревич., Ю. Куц. – К.:Вища школа, 1983.– 83 с.
93. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В. Денисов, Д. Дубинин. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002.–251 с.

94. Куц Ю.В. Застосування модулярної арифметики для обчислення азимута у фазових пеленгаторах // Ю. Куц, В. Куц. – К.: Вісник НТУУ "КПІ". Серія радіотехніка, радіоапаратобудування, 2016.– № 64.–С. 23-32.
95. Пат. 100756 Україна, МПК G01B17/02. Ультразвуковий двошкальний спосіб вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201501408; заявл. 19.02.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. –3 с.
96. . Олійник Ю.А. Використання ультразвукового двошкального способу для підвищення точності вимірювання товщини виробів / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, В.Ю. Куц, Ю.В. Куц, О.В. Монченко // Системи обробки інформації. – Харків, 2015. – №7(132). – С. 6-10.
97. Олійник Ю.А. Двошкальний фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, О.В. Монченко, О.Д. Близнюк // XV Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2018: стан і перспективи». Збірник тез доповідей /КПІ ім. І. Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2018. – С. 177-178.
98. Кулаков Ю.О. Дослідження кругових медіанних фільтрів в задачах аналізу фазових характеристик сигналів/ Ю.О.Кулаков, В.Ю.Куц // Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Сборник трудов конференции. Моделирование 2008. Том 2. с. 429-434.
99. Куц Ю. В. Применение выборочных характеристик расположения и рассеяния в фазометрии // Ю. В. Куц, Н. Е. Куц // Электронное моделирование.- 2004.- Т. 26. - №2. – С. 89-97.
100. Derhunov O. Improvement of ultrasonic testing method for materials with significant attenuation / O. Derhunov, Y. Kuts, O. Monchenko, Y. Oliinyk, S. Shengur // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, ISSN 1729-3774. – 1/9(91) 2018.–Р.54-610. (Входить до SCOPUS).
101. Бистра І.М. Аналіз ефективності фазового методу виявлення сигналів ультразвукового контролю / І.М. Бистра, Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, В.К. Цапенко // XI Міжнар. науково-технічна конференція «Авіа-2013». Збірник тез доповідей /НАУ. – Київ, 2013. – Том І. – С. 1.9-1.12.

102. Математическая энциклопедия / Гл. ред. И. М. Виноградов. – М.: Советская энциклопедия. Т. 4, 1984. – 1216 с.
103. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех / Шестов Н.С. – М.: Сов. радио, 1967 г. – 347 с.
104. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. Шк., 1990. – 496 с.
105. Автоматизация производства и промышленная электроника. В 4 тт. / Гл. ред. А.И. Берг, В. А. Трапезников. –Т.3, М.: Советская энциклопедия, 1964. –487 с.
106. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы (Основы статистической теории) /В.П. Пестряков. – М.: Сов.радио, 1968. – 466 с.
107. Монченко О.В. Дослідження впливу апертури вікна для виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії композиційних матеріалів / О.В. Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник // VI Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Зб. тез доповідей / ЧНТУ. – Чернігів, 2016.– С. 346.
108. Куц Ю.В. Практична реалізація фазового способу ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк, О.В.Монченко, Ю.А. Олійник // 7-а науково-технічна конференція «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання». Збірник тез доповідей / ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 49-53.
109. Мокийчук В.М. Оценивание неопределенности измерения модуля Юнга / В.М. Мокийчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // XIII Междунар. научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты». Сборник докладов / БелГИМ. – Минск, Беларусь, 2016. – С.93.
110. Олійник Ю.А. Експериментальні дослідження фазового методу ультразвукового неруйнівного контролю / Ю.А. Олійник, І.М. Бистра, Ю.В.

- Куц // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2013. – № 1/9 (61). – С.49-52.
111. Куц Ю.В. Фазовий спосіб ультразвукової толщинометрії / Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк, Ю.А. Олійник // Ж-л «Научни известия на НТСМ». – Созополь, Болгария, 2013. – № 2(139). – С.57-61. (Входить до TheWeb'sLargestOpen Access Databaseof NTD, GoogleScholar).
112. Мокійчук В.М. Методика оцінювання невизначеності вимірювання пружних констант матеріалів / В.М. Мокійчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // Системи обробки інформації. – Харків, 2016. – №6(143). – С. 93-96.
113. Васілевський О.К. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник / О.М. Васілевський, В.Ю. Кучерук, Є.Т. Володарський. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 230 с.].

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації та апробація результатів дисертації

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2012, 2013, 2015, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м. Київ, 2013, 2015, 2018); міжнародній конференції «Дні неруйнівного контролю» (Болгарія, 2013); міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2013» (Київ, 2013); міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (Київ, 2014); науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2014); міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, 2015); міжнародному науково-технічному семінарі «Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты» (Мінськ, Беларусь, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (Харків, 2016).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані в 21 науковій праці, з яких: 5 у фахових виданнях України та 1 у закордонному виданні (в тому числі 1, що входять до науково-метричної бази Scopus, 1 – до The Web's Largest Open Access Database of NTD та Google Scholar), 2 патенти України на корисну модель, 13 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Статті у журналах, включених до наукометричних баз (*Index Copernicus*)

1. Олійник Ю.А. Фазовый способ ультразвуковой толщинометрии / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, Ю.В. Куц, В.Ю. Куц, //«Научни известия на НТСМ». –

Созополь, Болгария, 2013. – № 2(139). – С.57-61. (Входить до The Web's Largest Open Access Database of NTD, Google Scholar). *Здобувачем сформульована постановка задачі, розроблена методика проведення досліджень та опрацювання експериментальних даних.*

2. Derhunov O. Improvement of ultrasonic testing method for materials with significant attenuation / O. Derhunov, Y. Kuts, O. Monchenko, Y. Oliinyk, S. Shengur // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, ISSN 1729-3774. – 1/9(91) 2018.–Р.54-610. (Входить до SCOPUS). *Здобувачем виконано аналіз літературних джерел, базового та удосконаленого (з ваговою обробкою r -статистики) методів виявлення сигналів УЗТ.*

Наукові статті

3. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – Київ, 2013. – № 1. – С. 23-27. *Здобувачем запропоновано використання в ультразвуковій товщинометрії фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх фазовими характеристиками, а також виконані експериментальні дослідження запропонованого способу.*

4. Олійник Ю.А. Експериментальні дослідження фазового методу ультразвукового неруйнівного контролю / Ю.А. Олійник, І.М. Бистра, Ю.В. Куц // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2013. – № 1/9 (61). – С.49-52. *Здобувачем експериментально підтверджено ефективність статистичної обробки фазових характеристик сигналів ультразвукового контролю в задачах виявлення сигналів на фоні значного шуму.*

5. . Олійник Ю.А. Використання ультразвукового двошкального способу для підвищення точності вимірювання товщини виробів / Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, В.Ю. Куц, Ю.В. Куц, О.В. Монченко // Системи обробки інформації. – Харків, 2015. – №7(132). – С. 6-10. *Здобувачем виконано модельні та експериментальні дослідження двошкального способу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії.*

6. Мокійчук В.М. Методика оцінювання невизначеності вимірювання пружних констант матеріалів / В.М. Мокійчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // Системи обробки інформації. – Харків, 2016. – №6(143). – С. 93-96. *Здобувачем виконано оцінювання невизначеності вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракті приладу ультразвукового контролю.*

Патенти

7. Пат. 79972 Україна, МПК G01B17/02. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.В. Куц, В.Л. Найда, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201212606; заявл. 05.11.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. №9. – 4с. *Здобувачем теоретично обґрунтований спосіб ультразвукової товщинометрії з використанням фазомодульованих сигналів-носіїв.*

8. Пат. 100756 Україна, МПК G01B17/02. Ультразвуковий двошкальний спосіб вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко. – № u201501408; заявл. 19.02.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. – 3 с. *Здобувачем запропоноване використання додаткових фазових вимірювань сигналу-носія та узгодження результатів грубого і точного вимірювань затримки сигналу.*

Тези доповідей

9. Олійник Ю.А. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.К. Цапенко // II Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2012. – С.101. *Здобувачем досліджено алгоритми опрацювання фазоманіпульованих сигналів ультразвукової товщинометрії.*

10. Олійник Ю.А. Фазовий спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.А. Олійник // III Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2013. – С.154-156. *Здобувачем проаналізовано спосіб ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів.*

11. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, В.К. Цапенко // XII Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2013: стан і перспективи». Збірник тез доповідей /КП, Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 223-224. *Здобувачем запропоновано структуру експериментальної установки та методик експериментальних досліджень.*

12. Бистра І.М. Аналіз ефективності фазового методу виявлення сигналів ультразвукового контролю / І.М. Бистра, Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, В.К. Цапенко // XI Міжнар. науково-технічна конференції «Авіа-2013». Збірник тез доповідей /НАУ. – Київ, 2013. – Том I. – С. 1.9-1.12. *Здобувачем виконано оцінювання похибок першого і другого роду у задачі виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії за r -статистикою, обчисленою за фазовою характеристикою сигналу.*

13. Олійник Ю.А. Прецизійне вимірювання товщини фазовим способом ультразвукової товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, В.В. Левківська, О.В.Монченко // VII Міжнар. науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси». Збірник тез доповідей / НАУ. – Київ, 2014. – С. 94. *Здобувачем проаналізовано можливості двошкального методу ультразвукової товщинометрії з використання фазоманіпульованих сигналів.*

14. Куц Ю.В. Практична реалізація фазового способу ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк, О.В.Монченко, Ю.А. Олійник // 7-а науково-технічна конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання». Збірник тез доповідей / ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 49-53. *Здобувачем експериментально доведена можливість використання вузькосмугових p -єзоелектричних перетворювачів для передачі фазоманіпульованих сигналів в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів.*

15. Куц Ю.В. Особливості поширення фазоманіпульованих сигналів в електроакустичних трактах ультразвукових товщиномірів / Ю.В. Куц, О.В.

Монченко, Ю.А. Олійник, Р.М. Галаган // XIV Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2015: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 174-175. *Здобувачем досліджено і експериментально підтверджено можливість передачі стрибків фазової характеристики сигналів після їх поширення в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів.*

16. Олійник Ю.А. Дослідження амплітудно-частотних характеристик п'єзоперетворювачів для фазових ультразвукових приладів неруйнівного контролю / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, О.В. Монченко // V Міжнар. науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧДТУ. – Чернігів, 2015. – С.244. *Здобувачем експериментально отримані і проаналізовані амплітудно-частотні характеристики п'єзоперетворювачів для лунаїмпульсних ультразвукових товщиномірів з фазоманіпульованими сигналами-носіями.*

17. Олійник Ю.А. Використання фазоманіпульованих сигналів для підвищення точності вимірювання товщини виробів з композиційних матеріалів / Ю.А. Олійник, Б.В. Добржанська, О.В. Монченко // III Міжнар. наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». Збірник тез доповідей / ВНТУ. – Вінниця, 2015. – С.32. *Здобувачем запропонована методика оброблення фазоманіпульованих сигналів в ультразвукових товщиномірах та виконувались експериментальні дослідження.*

18. Мокийчук В.М. Оценивание неопределенности измерения модуля Юнга / В.М. Мокийчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // XIII Междунар. научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты». Сборник докладов / БелГИМ. – Минск, Беларусь, 2016. – С.93. *Здобувачем запропонована методика оцінювання невизначеності вимірювання затримки сигналу в електроакустичному тракті приладів ультразвукового контролю.*

19. Монченко О.В. Дослідження впливу апертури вікна для виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії композиційних матеріалів / О.В.

Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник // VI Міжнар. науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Збірник тез доповідей / ЧНТУ. – Чернігів, 2016. – С. 346. *Здобувачем проаналізовано вплив зміни апертури вікна на вірогідність виявлення сигналів ультразвукової товщинометрії.*

20. Монченко О.В. Розробка методів оброблення фазової характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії з підвищеною достовірністю / О.В. Монченко, Б.В. Добржанська, Ю.А. Олійник, Р.О. Ткачик // X Міжнар. науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Збірник тез доповідей / Інститут Метрології. – Харків, 2016. – С.25. *Здобувачем надано рекомендації щодо методики оброблення фазової характеристики сигналів ультразвукової товщинометрії.*

21. Олійник Ю.А. Двошкальний фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії / Ю.А. Олійник, Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, О.В. Монченко, О.Д. Близнюк // XV Міжнар. науково-технічна конференція «Приладобудування 2018: стан і перспективи». Збірник тез доповідей /КПІ ім.. І. Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2018. – С. 177-178. *Здобувачем проведені комп'ютерні обчислювальні експерименти та відпрацьовано програмну реалізацію процесу опрацювання експериментальних даних.*

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер Державного підприємства «Луцький ремонтний завод «Мотор»



С. Свистюла
2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційної роботи

Ми, що нижче підписались, головний технолог, начальник технічного відділу ДП «ЛРЗ Мотор» М.Котик, заступник директора з якості ДП «ЛРЗ Мотор» О. Трегуб

склади цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Олійника Юрія Анатолійовича використовуються при проведенні випробувань виробів авіаційної техніки на державному підприємстві «Луцький ремонтний завод «Мотор».

| Найменування впровадженого результату | Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект |
|--|--|
| Спосіб ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії для неруйнівного контролю виробів авіаційної техніки | Методика проведення прецизійних вимірювань товщини об'єктів контролю ультразвуковим луна-імпульсним методом. |

Головний технолог, начальник технічного відділу ДП «ЛРЗ «Мотор»

 М. Котик



Заступник директора з якості ДП «Мотор»

 О.Трегуб

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан приладобудівного факультету
 Національного технічного університету України
 «Київський політехнічний інститут
 імені Ігоря Сікорського»,
 д.т.н., професор

 Г.С. Тимчик
 «15»  2019 р.

АКТ

про впровадження в навчальному процесі
 матеріалів кандидатської дисертаційної роботи
 Олійника Юрія Анатолійовича

Даним актом представники кафедри «Приладів і систем неруйнівного контролю» КПІ ім. Ігоря Сікорського в особах професора каф. ПСНК Маєвського С.М., доцента каф. ПСНК Галагана Р.М. та завідувача каф. ПСНК Протасова А.Г., засвідчуємо, що результати дисертаційної роботи здобувача кафедри прилади і системи неруйнівного контролю приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» **Олійника Юрія Анатолійовича «Методи ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованих сигналів та їх реалізація»** використовуються в навчальному процесі кафедри «Прилади і системи неруйнівного контролю» приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського та в розробленні методичного забезпечення дисципліни «Новітні системи та технології, а саме:

- вдосконалений ультразвуковий метод вимірювання товщини виробів з конструкційно міцних матеріалів;
- методика опрацювання сигналів ультразвукової товщинометрії з використанням фазоманіпульованого сигналу-носія.

Завідувач кафедри прилади і системи
 неруйнівного контролю,
 д.пед.н., к.т.н., доц.

професор каф. ПСНК, д.т.н., проф.
 доцент каф. ПСНК, к.т.н. доц.

 А.Г. Протасов

 С.М. Маєвський

 Р.М. Галаган

ДОДАТОК Г

Лістинг програми формування та опрацювання сигналів УЗТ за амплітудо-фазовим лунаїмпульсним методом УЗТ з використанням сигналів-носіїв з фазовою маніпуляцією

```
clear all;close all hidden;
U1=5;
f=5;
T=1/f;
T1=linspace(0,2*T,40);
T2=linspace(2*T,4*T,40);
T3=linspace(4*T,12*T,160);
T4=linspace(16*T,20*T,80);
A1=U1*sin(2*3.14*f*T1);
A2=U1*(-sin(2*3.14*f*T2));
Ai=[A1, A2(2:40),0];
A3=zeros(size(T3));
A4=Ai/7;
A5=zeros(size(T4));
A=[Ai,A3, A4,A5];
[FiAN1, Ob1, D1]=Hilb(A);
Ti=linspace(0,20*T,400);
V=medfilt1(sign(Ob1-0.5),21);
V=0.5.*(V+1);
subplot(4,1,1); plot(Ti, A);grid on
axis([0 (20*T) -6 6]);
subplot(4,1,2); plot(Ti,[0,D1]);grid on;
subplot(4,1,3); plot(Ti,Ob1);grid on;
subplot(4,1,4); plot(Ti,(V.*[0,D1])); grid on;
```

Лістинг програми опрацювання сигналів за двошкальним методом лунаїмпульсної УЗТ

```
clear all;close all hidden;
f=5;f0=5;
n=2;T=1/f;
dt=T/20;T0=1/f0;
omega=2*pi*f;
S1=0;C1=0;S2=0;C2=0;
t1=linspace(0,n*T,(n*T/dt));
t0=linspace(0,2*n*T,(2*n*T/dt));
% A=1-cos(pi.*f./n.*t0);
A=1;
```



```

y1=5*sin(2.*pi.*f.*1.0.*t1);
y2=5*sin(2.*pi.*f.*1.0.*t1+pi*.95);
y2(1)=[]; y2=[y2,0];
y=[y1,y2].*A;
Ti=linspace(0,70,(70/dt));
ys=2.5*sin(2.*pi.*f0.*1.0.*Ti);
s1=zeros(size(Ti)); s2=zeros(size(Ti));
s3=zeros(size(Ti));
s4=zeros(size(Ti));
taul=0;tau2=19/dt;tau3=37.8/dt; tau4=56.7/dt;
r=randn(size(Ti)); r=r*.7;
s1(taul+1:taul+length(y))=y;
s2(tau2+1:tau2+length(y))=y*.7;
s3(tau3+1:tau3+length(y))=y*.0.7;
s4(tau4+1:tau4+length(y))=y*.0.7;
s=s1+s2+s3+s4+r;
s0=s1+s2+s3+s4;
[FiAN1, Ob1, D1]=Hilb(s);
[FiAN0, Ob0, D0]=Hilb(s0);
[FiANs, Obs, Ds]=Hilb(ys);
D1=[D1,0];
D0=[D0,0];
Ds=[Ds,0];
V=medfilt1(sign(Ob1-2),100);
V=0.5.*(V+1);% стробы
MD=abs(V.*D1);
[pks,locs]=findpeaks(MD,'minpeakdistance',500);
I1=locs(1);
I2=locs(2);
taug=(I2-I1)*dt
fi1=FiANs(I1); fi2=FiANs(I2);
fi=fi2-fi1;
%taug2=fi/(2*pi*f);
Fg=omega*taug;
N=fix((taug/T));
N1=taug/T;
S1=sum(sin(FiANs((I1+5):(I1+65))));
C1=sum(cos(FiANs((I1+5):(I1+65))));
S2=sum(sin(FiANs((I2+5):(I2+65))));
C2=sum(cos(FiANs((I2+5):(I2+65))));
fim1=atan2(S1,C1);
fim2=atan2(S2,C2);
Fim=fim2-fim1;
dn=Fim/(2*pi)
taucor=(N+dn)*T;

```

```

delta1=(taug-(18.9))/dt;
delta=(taucor-(18.9))/dt;
result1=[1900, (I2-I1), taucor/dt]
figure%1
subplot(5,1,1)
plot(s,'LineWidth',2);grid on
subplot(5,1,2)
plot(FiAN1,'LineWidth',2);grid on
subplot(5,1,3)
plot(D1,'LineWidth',2);grid on
subplot(5,1,4);
plot(Ob1,'LineWidth',2);grid on
subplot(5,1,5);
    plot((V.*D1),'LineWidth',2); grid on; hold on;
    plot (V,'black');
figure%2
subplot(5,1,1)
plot(s,'LineWidth',2);grid on; hold on;
plot(ys,'r');
subplot(5,1,2)
plot(ys,'LineWidth',2);grid on
subplot(5,1,3)
plot(FiAN1,'LineWidth',2);grid on; hold on
plot(FiANs,'r');
subplot(5,1,4);
plot(FiANs,'LineWidth',2);grid on; hold on%
H=mod(FiAN1-FiANs,2*pi);
plot(H,'r');
subplot(5,1,5);
plot((V.*D1),'LineWidth',2); grid on; hold on;
plot ( V,'black');

```

Лістинг програми дослідження г-статистики шумової складової сигналу

УЗТ

```

close all hidden; clear all;
dT=1/50E4;dT2=1/50E4;fr=5E3;
T=dT:dT2:dT.*10000;N=length(T);n=1:N;
z=zeros(1,N);z1=zeros(1,N);zh=zeros(1,N);zh1=zeros(1,N);
fi=zeros(1,N);fi1=zeros(1,N);%
A=zeros(1,N);A1=zeros(1,N);Fi=zeros(1,N);Fi1=zeros(1,N);
Fi0=2.*pi.*fr.*T;
R1=zeros(1,N);stdR1=zeros(1,N); As1=zeros(1,N);
Ex1=zeros(1,N);St1=zeros(1,N);

```

```

R2=zeros(1,N);stdR2=zeros(1,N); As2=zeros(1,N);
Ex2=zeros(1,N);St2=zeros(1,N);
R3=zeros(1,N);stdR3=zeros(1,N); As3=zeros(1,N);
Ex3=zeros(1,N);St3=zeros(1,N);
R4=zeros(1,N);stdR4=zeros(1,N); As4=zeros(1,N);
Ex4=zeros(1,N);St4=zeros(1,N);
tau0=.001; tau=.0008;
z=(gauspuls(T-tau0*3,fr,.2)+...
...gauspuls(T-tau0*17,fr,.2).*0.5);
z=z.*0;
sigma1=0;
dsigma=1;
S=1;
k1=1;
m1=k1./(fr.*dT2);%=1
k2=2;m2=k2./(fr.*dT2);%=200
k3=3;m3=k3./(fr.*dT2);%=300
k4=4;m4=k4./(fr.*dT2);%=400
for s=1:S;
    sigma(s)=sigma1+(s-0).*dsigma;
    stn(s)=1/(eps+sigma(s));
    randn('state',1813);%???
    z1=z.*1+sigma(s).*randn(1,N);%
    zh=imag(hilbert(z));%
    zh1=imag(hilbert(z1));%
    fi=atan2(zh,z);%
    fil=atan2(zh1,z1);%
    A=sqrt(z.^2+zh.^2);%
    A1=sqrt(z1.^2+zh1.^2);%
    dfi=unwrap(fil)-Fi0;
    for l=1:1:N-m1;
        dfiw=dfi(l:(l+m1-1));
        S=sum(sin(dfiw));C=sum(cos(dfiw));
        R1(l+m1/2-1)=abs(C+i.*S)./m1;
    end
    d=R1-medfilt1(R1,199);% R1
    for l = 1:1:N-m1;
        stdR1(l+m1/2-1)=std(R1(l:(l+m1-1)));
    end
end
figure%1
subplot(2,1,1);plot(z1);hold on;plot(z,'r')
subplot(2,1,2);plot(R1,'r');
title('Fig.1. Grafic r-statistic');grid on
figure%2

```

```

plot (fil);title('Fig.2.Grafic fil');grid on
figure%3
plot(A1);title('Fig.3.Grafic amplitude');grid on
figure%4
plot(dfi);
title('Fig.4.Grafic diffehenche of phaze');
grid on;hold on
plot(unwrap(fil),'r')
Rm3a = zeros(0,150);
Rm3b = zeros(0,150);
Rm3c = zeros(0,150);
Rm4 = zeros(0,150);
h=1
for m3=20:2:150
    for l=1:1:N-m3;
        dfiw=dfi(l:(l+m3-1));
        S=sum(sin(dfiw));    C=sum(cos(dfiw));
        R1(l+m3/2-1)=abs(C+i.*S)./m3;
    end
    Rm3a(h)=mean(R1);%Rm3a(m3+1)=mean(R1);
    Rm3b(h) = max(R1);%Rm3b(m3+1) = max(R1);
    Rm3c(h) = max(R1)-mean(R1);%;
    Rm4(h) = std(R1);%Rm4(m3+1) = std(R1);
    h=h+1;
end
M3=20:2:150;
figure%5;
title('Fig.5.Grafic of r-statistic mean and r-statistic
max - red');grid on
plot(M3,Rm3a); hold on;grid on
%plot(M3,Rm3b, 'r');grid on
%plot(M3,Rm3c, 'g');grid on

figure%6;
title('Fig.4.Grafic diffehenche of phaze');
grid on;hold on
plot(M3,Rm4); grid on;
figure
plot(M3,Rm3a, '-.',M3,Rm3a-Rm4, 'k',M3,Rm3a+Rm4, 'k')

```

Лістинг програми дослідження зваженої r-статистики сигналу УЗТ

```

close all hidden; clear all;
dT=1/50E4;dT2=1/50E4;fr=5E3;
T=dT:dT2:dT.*10000;N=length(T);n=1:N;

```

```

z=zeros(1,N);z1=zeros(1,N);zh=zeros(1,N);zh1=zeros(1,N);f
i=zeros(1,N);fi1=zeros(1,N);%
A=zeros(1,N);A1=zeros(1,N);Fi=zeros(1,N);Fi1=zeros(1,N);
Fi0=2.*pi.*fr.*T;
R1=zeros(1,N);stdR1=zeros(1,N); As1=zeros(1,N);
Ex1=zeros(1,N);St1=zeros(1,N);
R2=zeros(1,N);stdR2=zeros(1,N); As2=zeros(1,N);
Ex2=zeros(1,N);St2=zeros(1,N);
R3=zeros(1,N);stdR3=zeros(1,N); As3=zeros(1,N);
Ex3=zeros(1,N);St3=zeros(1,N);
R4=zeros(1,N);stdR4=zeros(1,N); As4=zeros(1,N);
Ex4=zeros(1,N);St4=zeros(1,N);
tau0=.001;
tau=.0008;
z=(gauspuls(T-tau0*3,fr,.2)...
...+gauspuls(T-tau0*17,fr,.2).*0.5);
z=z.*1;
sigma1=0;%
dsigma=1;
S=1;%
k1=1;%
m1=k1./(fr.*dT2);%=100
k2=2;m2=k2./(fr.*dT2);%=200
k3=3;m3=k3./(fr.*dT2);%=300
k4=4;m4=k4./(fr.*dT2);%=400
for s=1:S;
    sigma(s)=sigma1+(s-0).*dsigma;
    stn(s)=1/(eps+sigma(s));
    randn('state',813);%???
    z1=z.*1+sigma(s).*randn(1,N);%
    zh=imag(hilbert(z));%
    zh1=imag(hilbert(z1));%
    fi=atan2(zh,z);%
    fi1=atan2(zh1,z1);%
    A=sqrt(z.^2+zh.^2);%
    A1=sqrt(z1.^2+zh1.^2);%
    dfi=unwrap(fi1)-Fi0;
    for l=1:1:N-m1;
        dfiw=dfi(l:(l+m1-1));
        S=sum(sin(dfiw)); C=sum(cos(dfiw));
        R1(l+m1/2-1)=abs(C+i.*S)./m1;
    end
    d=R1-medfilt1(R1,199);
    for l = 1:1:N-m1;
        stdR1(l+m1/2-1)=std(R1(l:(l+m1-1)));

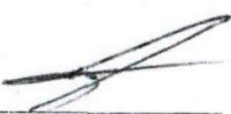
```

```

end
end
m2=300
for l = 1:1:N-m2;
    stdR2(l+m2/2-1)=std(R1(l:(l+m2-1)));
    end
    figure%1
    subplot(2,1,1);plot(z1);hold on;plot(z,'r')
    subplot(2,1,2);plot(R1,'r');title('Fig.1. Grafic r-
statistic');grid on
    figure%2
    plot (fil);title('Fig.2.Grafic fil');grid on
    figure%3
    plot(A1);title('Fig.3.Grafic amplitude');grid on
    figure%4
    plot(df1);;title('Fig.4.Grafic diffehence of
phaze');grid on;hold on
    plot(unwrap(fil),'r')
    figure%5
    subplot(2,1,1);plot(n,z1,n,z,'w')
    subplot(2,1,2);plot(n,R1);hold on
    plot(n,R1.*stdR2.*8.5,'LineWidth',2)
    figure%6
    subplot(2,1,1);plot(n,z1,n,z,'w')
    subplot(2,1,2);plot(n,medfilt1(R1,199));hold on
    plot(n,medfilt1(R1.*stdR2.*8.5,199),'LineWidth',2)

```

ДОДАТОК Д

| | |
|---|---|
| МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО “ХАРКІВСЬКИЙ РЕГІОНАЛЬНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ” /ДП “Харківстандартметрологія”/ Вул. Мироносицька, 36, м. Харків, 61002, Україна Уповноважено Мініекономрозвитку України Свідоцтво про уповноваження № ПК 003-2014 від 16.05.2014 р. | |
| С В І Д О Ц Т В О ПРО ПОВІРКУ ЗАКОНОДАВЧО РЕГУЛЬОВАНОВОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ | |
| № <u>03/5621</u> | Чинне до <u>23 серпня 2019 р.</u> |
| Назва та умовне позначення <u>Калібрувальний зразок для</u> <u>ультразвукового контролю СО-3Р</u> Зав № <u>1912</u> | |
| Виробник <u>Україна</u> | |
| За результатами перевірки встановлено, що засіб вимірювальної техніки (далі – ЗВТ) відповідає вимогам: | |
| <u>ГОСТ 18576-85 «Контроль неразрушающий. Рельсы</u> <small>позначення та назва документа, що містить вимоги до метрологічних характеристик і (або)</small> <u>железнодорожные. Методы ультразвуковые».</u> | |
| Час розповсюдження ультразвукових коливань $\tau_{20} = 19,94$ мкс | |
| Швидкість розповсюдження подовжніх хвиль $v_{\text{прод}} = 5913,9$ м/с <small>за потреби, значення метрологічних характеристик (клас точності, похибки, діапазон вимірювання тощо)</small> | |
| Особливі застосування ЗВТ <u>відсутні</u> <small>Обмеження (за зверненням заявника) кількості фізичних величин і діапазонів (частини діапазонів) вимірювань</small> | |
| Додаток на _____ стор. Персонал, який виконував роботи з перевірки Місце відбитка поперечного тавра |  підпис Ю.М. Сосновіков ініціали, прізвище |
| <u>23 серпня 2018 р.</u> | |